

Berichte  
aus dem  
Institut für Meereskunde  
an der  
Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Nr. 38  
1977

OBJEKTIVE ANALYSEN METEOROLOGISCHER  
PARAMETER ÜBER DER KIELER BUCHT

von  
EDILBERT KIRK

DOI 10.3289/IFM\_BER\_38

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde  
Abt. Maritime Meteorologie  
Düsternbrooker Weg 20  
D 2300 K i e l 1

---

ISSN 0341-8561

OBJEKTIVE ANALYSEN METEOROLOGISCHER  
PARAMETER ÜBER DER KIELER BUCHT

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung  
des Grades eines Diplommeteorologen des  
Fachbereiches Mathematik-Naturwissenschaften  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von: Edilbert Kirk  
Referent: Prof. Dr. P. Speth  
Koreferent: Prof. Dr. Fr. Defant

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein Verfahren entwickelt, mit dem objektive Analysen über kleinräumigen Gebieten ohne Verwendung eines Gitters durchgeführt werden können. Mit Legendre'schen Polynomen und der Methode der kleinsten Quadrate werden Funktionen der analysierten Größe über dem Gebiet berechnet.

Die Anwendung des Verfahrens erfolgt für ein quadratisches Gebiet über der Kieler Bucht mit einer Seitenlänge von 120 km. Bearbeitet werden die Daten von 25 Stationen in der Zeit vom 1. April 1976 bis 31. Oktober 1976. Für die meteorologischen Parameter Druck, Temperatur, spezifische Feuchte und Wind werden solche Analysen durchgeführt. Es werden Felder der einzelnen meteorologischen Variablen dargestellt, und die artspezifischen Effekte diskutiert. Schließlich wird die Brauchbarkeit des Verfahrens in Hinsicht auf die Verwendung der Ergebnisse in numerischen Modellen besprochen, und ein Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

## ABSTRACT

A special method is developed, in order to obtain objective analyses inside small areas without using a grid. Functions of analyzed parameters are calculated inside these areas using polynomials of LEGENDRE and the method of least squares.

This method of analysis is applied for a quadratic area of 65 x 65 miles covering the "KIELER BUCHT". Data of 25 stations from April 1st, 1976 until October 31st, 1976 are used to analyze pressure, temperature, specific humidity and wind. Fields of these meteorological parameters are presented and their specific effects investigated. With regard to the suitability of the results the usefulness of the applied method in numerical models is discussed and a view is presented for further application.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
3. Praktische Durchführung der Analyse	6
3.1. Koordinatentransformation	6
3.2. Gewichtsrechnung	7
3.3. Effektivstationszahl	7
3.4. Ordnung der Analysefunktion	9
3.5. Gebiet	10
3.6. Lösbarkeit des Gleichungssystems	11
4. Datenmaterial	14
4.1. Stationen	14
4.2. Datenaufbereitung	16
4.3. Datenausfall und Interpolation	18
5. Analyseprogramm	19
5.1. Blockdiagramm	19
5.2. Kurzbeschreibung	20
6. Numerische Instabilitäten	22
7. Analyse verschiedener meteorologischer Größen	27
7.1. Darstellung der Felder	27
7.2. Artspezifische Effekte und Ergebnisse	29

	Seite
7.2.1. Druck	29
7.2.2. Temperatur	34
7.2.3. Spezifische Feuchte	35
7.2.4. Wind	37
7.3. Darstellung aller Analysen des 26. Juni 1976	42
7.3.1. Druck	44
7.3.2. Temperatur	44
7.3.3. Spezifische Feuchte	52
7.3.4. Wind	57
8. Weitere Anwendungsmöglichkeiten	63
9. Beurteilung des Verfahrens	65
Verzeichnis der Abbildungen	67
Verzeichnis der Tabellen und Diagramme	68
Literaturverzeichnis	69
Anhang: Auf Magnetband bereitgestellte Daten	70

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Zur Unterstützung der Untersuchungen über Art und Auswirkung der Meeresverschmutzung wird im Institut für Meereskunde zur Zeit ein ozeanographisches Meerschichtenmodell der Kieler Bucht entwickelt. Unter Kieler Bucht wird derjenige Teil der Ostsee verstanden, der zwischen den dänischen Inseln im Norden und Fehmarn im Osten liegt (s. Abb. 1),

Im Modell soll eine Vorhersage von Wasserstand, Schichtung und Strömung erfolgen. Dies ist nur möglich durch Kenntnis der Einwirkung der Atmosphäre auf die Meeresoberfläche. Dabei handelt es sich um die vom Wind auf die Wasseroberfläche ausgeübte Schubspannung und um die vertikalen Flüsse von sensibler und latenter Energie. Zur Berechnung dieser Größen werden Felder der meteorologischen Größen Wind, Temperatur und Feuchte verwendet. Die Windfelder können auf zwei verschiedene Weisen berechnet werden; einerseits mit Hilfe des Luftdruckfeldes, durch Berechnung des geostrophischen Windes unter Berücksichtigung des Bodenreibungswinkels und andererseits durch direkte Analyse des gemessenen Windes.

Mit dem Ziel, die für das Modell notwendigen Felder zu bestimmen, besteht die Aufgabe der vorliegenden Arbeit darin, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem für ein beliebiges vorgegebenes Gitter die Werte von Wind, Druck, Temperatur und Feuchte an allen Gitterpunkten berechnet werden können.

Weiterhin sollen für den Zeitraum 1. April 1976 bis 31. Oktober 1976 im dreistündigen Abstand alle Wind-, Druck-, Temperatur- und Feuchtefelder über der *Kieler Bucht* direkt berechnet werden. Die Ergebnisse sollen so auf Magnetband gespeichert werden, daß eine problemlose weitere Verwendung im oben beschriebenen Sinn möglich ist.

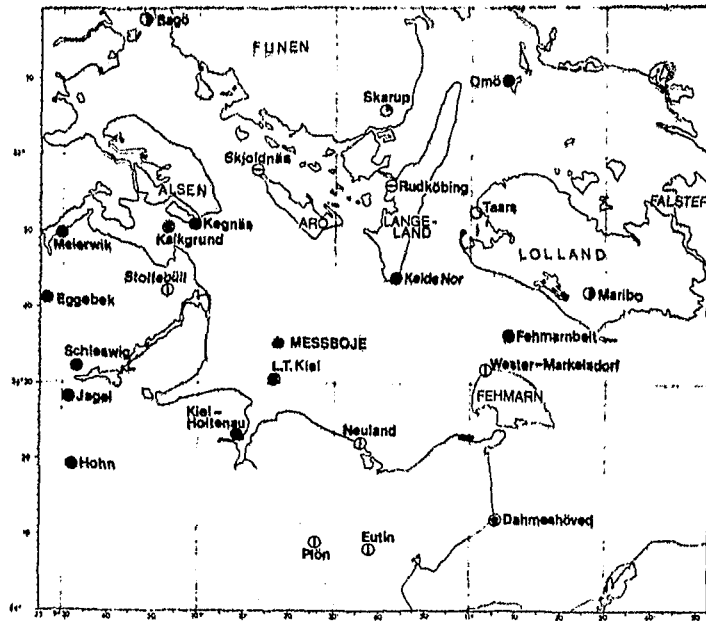


Abb. 1 Kieler Bucht mit Meßstationen



## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Nach einer Untersuchung von FECHNER (1977) wurde die Analyse mit Legendre'schen Polynomen gewählt.

Ziel der Analyse ist es, eine analytische Funktion  $F(x,y)$  zu finden, die den Meßwerten an den Stationskoordinaten  $x$  und  $y$  möglichst gut entspricht, und auch für andere beliebige Koordinaten im Analysegebiet einen realitätsnahen Wert liefert. Die Funktion steht für eine beliebige skalare Größe und wird als Produkt zweier Funktionen von  $x$  und  $y$  dargestellt. Sie hat die Form:

$$F(x,y) = G(x) \cdot H(y) \quad (1)$$

Die Funktionen  $G(x)$  und  $H(y)$  bestehen aus einer Summe von Legendre'schen Polynomen  $P_i$  mit dazugehörigen skalaren Koeffizienten.

$$G(x) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(x) \quad (2)$$

$$H(y) = \sum_{j=0}^n B_j P_j(y) \quad (3)$$

$n$  = Ordnung der Funktion

Führt man die Multiplikation aus, indem man nur Glieder mit einer Ordnung  $\leq n$  berücksichtigt, so folgt daraus:

$$\sum_{i=0}^n \left| \sum_{j=0}^{n-i} A_i B_j P_i(x) P_j(y) \right| = F(x,y) \quad (4)$$

Dieser Ausdruck läßt sich zusammenfassen, indem folgende Definitionen berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned} E_k &= A_i B_j \\ ZP_k(x,y) &= P_i(x) P_j(y) \\ k &= \frac{(i+1)(i+2)}{2} + j \end{aligned} \quad (5)$$

Aus (4) und (5) ergibt sich dann die Funktion zu:

$$F(x,y) = \sum_{k=1}^z E_k ZP_k(x,y) \quad (6)$$

$$z = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

In dieser Form eignet sie sich besonders gut für maschinelle Berechnungen, da nur noch ein Satz Koeffizienten bestimmt werden muß.

In den in dieser Arbeit vorgestellten Analysen beträgt die Ordnung  $n$  der Funktion  $F(x,y)$  2, 3 oder 4. Es mußten also sechs, zehn oder fünfzehn Koeffizienten bestimmt werden. Durch die festgelegte Form der Funktion ist es also möglich, jedes Feld durch einen kleinen Datensatz, nämlich die Koeffizienten festzulegen. Mit der in der Naturwissenschaft oft angewandten Methode der kleinsten Quadrate wird diejenige Funktion vorgegebener Form gesucht, für welche die Summe der Fehlerquadrate am kleinsten ist.

$$M^2 = \sum_{l=1}^q \left| f(x_l, y_l) - F(x_l, y_l) \right| = \text{Minimum} \quad (7)$$

$M^2$  = Summe der Fehlerquadrate

$q$  = Anzahl der Meßwerte

$f(x_l, y_l)$  = Meßwerte an den Koordinaten  $x_l$  und  $y_l$

$F(x_l, y_l)$  = Funktionswerte der Näherungsfunktion

Aus diesem Kriterium (7) läßt sich das Verfahren zur Bestimmung der Koeffizienten  $E_k$  herleiten. Gleichung (7) in ausführlicher Form lautet:

$$M^2 = \sum_{l=1}^q \left| f(x_l, y_l) - \sum_{k=1}^z E_k ZP_k(x_l, y_l) \right| \quad (8)$$

Differenziert man diese Gleichung partiell nach den Koeffizienten  $E_k$ , so erhält man eine Anzahl von  $z$  Differentialgleichungen der Form:

$$\frac{\partial M^2}{\partial E_h} = \sum_{l=1}^q 2 \left| f(x_l, y_l) - \sum_{k=1}^z E_k ZP_k(x_l, y_l) \right| ZP_h(x_l, y_l) = 0 \quad (9)$$

Weitere Umformungen führen zu:

$$\sum_{l=1}^q \sum_{k=1}^z \left| E_k ZP_k(x_l, y_l) \right| ZP_h(x_l, y_l) = \quad (10)$$

$$= \sum_{l=1}^q \left| ZP_h(x_l, y_l) f(x_l, y_l) \right| \quad (h = 1, \dots, z)$$

$$\sum_{k=1}^z E_k \sum_{l=1}^q \left| ZP_k(x_l, y_l) ZP_h(x_l, y_l) \right| = \quad (11)$$

$$= \sum_{l=1}^q \left| ZP_h(x_l, y_l) f(x_l, y_l) \right| \quad (h = 1, \dots, z)$$

Mit dem Gleichungssystem (11) kann im Prinzip schon die Bestimmung der Koeffizienten stattfinden. Es würde jedoch nur dann eine vernünftige Funktion berechenbar sein, wenn die Daten aus einem regelmäßigen Netz über dem Gebiet stammen. Bei der unregelmäßigen Verteilung der Meßstationen ist es jedoch unerlässlich, jeder Station noch ein Gewicht zuzuordnen. Das Verfahren der Gewichtsbestimmung wird im folgenden Abschnitt erläutert. Gleichungssystem (11) verändert sich durch Berücksichtigung bekannter Gewichte  $G_l$  zu:

$$\sum_{k=1}^z E_k \sum_{l=1}^q \left| G_l ZP_k(x_l, y_l) ZP_h(x_l, y_l) \right| = \quad (12)$$

$$= \sum_{l=1}^q \left| G_l ZP_h(x_l, y_l) f(x_l, y_l) \right| \quad (h = 1, \dots, z)$$

Das Gleichungssystem (12) folgt aus der Forderung (7), daß diejenigen  $E_k$  bestimmt werden, für die die Funktion  $M^2(E_k)$  ein Minimum aufweist. Da  $M^2$  eine positive, quadratische Funktion ist, kann die Funktion nur einen Extremwert aufweisen, der immer ein Minimum ist. Mit Bestimmung der Nullstellen der partiellen Ableitungen nach den Koeffizienten  $E_k$  wird dieses Minimum eindeutig berechnet.

### 3. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG DER ANALYSE

#### 3.1. Koordinatentransformation

Die Koordinaten der Stationen sind in geographischer Länge und Breite angegeben. Die Analyse soll aber auf einer rechteckigen Ebene erfolgen. Zu diesem Zweck muß eine Transformation in ein neues Koordinatensystem durchgeführt werden. Bei kleinen Gebieten, wie im vorliegenden Fall, kann dabei die Erdkrümmung vernachlässigt werden. Dadurch entsteht für die Eckstationen nur ein Fehler von ca. 0,8 % in der Angabe der x-Koordinate, die aus der geographischen Länge berechnet wird. Der Fehler in der y-Koordinate ist noch geringer. Es genügt also die geographische Länge und Breite linear auf x und y zu transformieren. Die x-Achse weist dabei nach Osten und die y-Achse nach Norden. Der Ursprung des neuen Systems kann frei gewählt werden; er sollte aber den Mittelpunkt des Analysegebiets bilden. Die längere Seite des Rechtecks soll 2 Einheiten lang sein, dann liegen alle Punkte des Analysegebiets im Intervall  $x, y \in (-1, +1)$ . Man wählt die Einheiten des neuen, kartesischen Systems in dieser Weise, damit im Gebiet die optimale Auflösung gewährleistet wird. Denn sämtliche Extremwerte und Nullstellen der Legendre-Polynome liegen im Intervall  $(-1, +1)$ . Bei größeren Gebieten kann analog verfahren werden, nur muß dann die Erdkrümmung stärker berücksichtigt werden. Die Transformation kann dann z.B. nach der stereographischen Projektion erfolgen.

### 3.2. Gewichtsberechnung

Die unregelmäßige Verteilung der meteorologischen Meßstationen macht eine Gewichtsverteilung notwendig. Andernfalls würde sich ergeben, daß die Funktion in Gebieten großer Stationsdichte eine hohe Genauigkeit aufweist, während es in stationsarmen Gebieten zu erheblichen Ungenauigkeiten kommt. Ziel der Gewichtsverteilung ist es also, Stationen in Ballungsgebieten ein geringeres Gewicht zuzuteilen, als Stationen, die vereinzelt stehen.

Das Verfahren der Gewichtsberechnung geschieht nach einer Methode von FECHNER (1977). Hierin wird für jede Station ein Polygon berechnet, dessen Eckpunkte benachbarte Stationen sind. Die Fläche dieses Polygons ist ein Maß für das Gewicht der Mittelstation. (s. Abb. 2). Es zählen aber nur die Bestandteile des Polygons, die auch gleichzeitig zum Analyserechteck gehören. Die Summe der Gewichte ist gleich der Fläche des Analyserechtecks. Auch außerhalb des Rechtecks liegende Stationen können ein Gewicht, aufgrund ihres Einflusses über den Rand in das Rechteck hinein, erhalten. Das geschieht immer dann, wenn keine innen liegenden Stationen in der Nähe des Randes sind.

### 3.3. Effektivstationszahl

Bei einer gleichmäßigen Verteilung aller Stationen über die Fläche könnte man die Ordnung der zu bestimmenden Funktion so hoch ansetzen, daß die Zahl der zu bestimmenden Koeffizienten gerade kleiner gleich der Zahl der Stationen ist. Dieses Vorgehen führt aber bei unregelmäßiger Verteilung der Stationen zu Instabilitäten in stationsarmen Gebieten. Die Funktion zeigt dann z.B. Extremwerte in Gebieten, in denen gar keine Messungen vorliegen. Es ist deshalb ein anderes Kriterium zur Festlegung der Ordnung notwendig. Wegen der normierten Gewichtsberechnung läßt sich hier eine sehr einfache



Größe definieren.

Die Effektivstationszahl (ESZ) wird folgendermaßen definiert:

$$ESZ = \frac{\sum_{l=1}^q G_l^2}{\sum_{l=1}^q (G_l)^2} = \frac{F^2}{\sum_{l=1}^q (G_l)^2} \quad (13)$$

$G_l$  = Gewichte

$F$  = Fläche des Analysegebiets

Die Definition ergibt sich aus der Forderung, daß die Effektivstationszahl für den Fall der regelmäßigen Anordnung, d.h. gleiche Gewichte für alle Stationen, gleich der tatsächlichen Stationszahl sein soll. Sind die Gewichte jedoch voneinander verschieden, bedeutet das eine Verkleinerung der ESZ gegenüber der tatsächlichen Stationszahl. Die ESZ wird umso kleiner, je größer die Gewichtsunterschiede unter den Stationen sind. Wählt man die Ordnung so, daß die Zahl der zu bestimmenden Koeffizienten kleiner gleich ESZ ist, so darf in der Regel eine stabile Funktion erwartet werden.

### 3.4. Ordnung der Analysefunktion

Grundsätzlich bedeutet eine höhere Ordnung, eine größere Auflösung der Funktion und eine bessere Anpassung der Funktion an die vorhandenen Meßwerte. Je höher die Ordnung, desto mehr Extremwerte und Sattelpunkte können auftreten. Allerdings besteht bei hoher Ordnung auch die Gefahr, daß Meßfehler oder Ungenauigkeiten die Analyse ganz erheblich beeinflussen. So kann z.B. eine systematische positive Abweichung in der Druckmessung an einer Station dazu führen, daß die Funktion an dieser Stelle ständig ein in der Realität nicht vorhandenes Maximum zeigt. Andererseits bietet aber auch die Funktion selbst die Möglichkeit, solche systematischen Abweichungen auf-

zuspüren, indem die Abweichungen über mehrere Analysen hinweg untersucht werden. Statistisch müssen nämlich bei Druckmessungen die Abweichungen mit gleicher Häufigkeit positiv und negativ sein. Ist die Abweichung dagegen systematisch immer zur einen Seite, kann man davon ausgehen, daß die Eichung des benutzten Instrumentes nicht mehr stimmt. Diese Überlegung gilt natürlich nur für solche Messungen, die weitgehend orographisch unbeeinflusst sind, also z.B. für Druckmessungen.

Wählt man die Ordnung niedriger, so wird dadurch eine Glättung bewirkt, welche Meßfehler mildern kann. Andererseits werden in dieser Weise Informationen verschonkt.

### 3.5. Gebiet

Es richtet sich vor allem nach dem vorhandenen Datenmaterial, wie das Analysegebiet zu wählen ist. Sind die Daten von so vielen Stationen vorhanden, daß das Gebiet frei wählbar ist, ist es zweckmäßig ein Quadrat zu wählen. Es sollte so groß sein, daß die berechnete Effektivstationszahl, die ja auch vom Gebiet abhängig ist, für die gewünschte Ordnung ausreicht. Für das Projekt "Kieler Bucht 76" lag der umgekehrte Fall vor. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Stationen stand fest, und das Gebiet mußte danach gewählt werden. In so einem Fall ist es zweckmäßig, das Gebiet so groß zu wählen, daß gerade noch alle Stationen ein Gewicht erhalten, daß aber einige Stationen auch noch außerhalb des Gebietes liegen, um auch für den Rand vernünftige Werte zu erhalten. Auch hier ist die Form des Quadrates vorzuziehen, da dann die beiden Funktionen  $G(x)$  und  $H(y)$  immer die gleiche Form haben. Es ist aber ebenso möglich, ein Rechteck zu wählen. Um dann aber immer eine flächenmäßig konstante Auflö-



sung zu bekommen, muß bei großen Unterschieden in den Seitenlängen die maximale Ordnung für  $G(x)$  und  $H(y)$  verschieden angesetzt werden. Einen Ansatz für solche allgemeinen Fälle wurde auch von FECHNER (1977) gemacht.

Im vorliegenden Fall wurde für das Gebiet ein Quadrat von 120 km Seitenlänge gewählt, von maximal 25 zur Verfügung stehenden Stationen erhält nur eine einzige kein Gewicht. 17 Stationen liegen im Analysequadrat und 8 außerhalb.

### *3.6. Lösbarkeit des Gleichungssystems*

Das Gleichungssystem ist nur dann lösbar, wenn die Zahl der zu bestimmenden Koeffizienten, die sich mit

$$z = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

aus der Ordnung  $n$  errechnet, kleiner gleich der Zahl der messenden Stationen ist. Bei vorgegebener Stationszahl muß also die Ordnung so gewählt werden, daß die Koeffizientenzahl nicht zu groß wird.

Nach Berechnung der Koeffizienten, ist die Funktion, welche die analysierte Größe beschreiben soll, bestimmt. Durch die Koordinatentransformation wird sichergestellt, daß die Funktion für alle beliebigen Koordinatenpaare  $x, y \in (-1, 1)$  realitätsnahe Werte liefert. Außerhalb dieses Gebietes wächst aber sehr schnell der Einfluß der höheren Potenzen, so daß Werte, die außerhalb des Intervalles  $x, y \in (-1.3, 1.3)$  durch die Funktion gewonnen werden, nicht mehr zuverlässig sind.

Nr.	Name	Koordinaten	Höhe über NN	Beobachtungstermine (GMT)
1	Meßboje KIBU 76	54°35'N 10°19'E	4	15 18 21
2	Taars	54°53'N 11°01'E		15 18 21
3	1442 Stoltebüll	54°42'N 9°53'E		- 20
4	3816 Neuland	54°23'N 10°36'E		- 20
5	3820 Plön	54°09'N 10°26'E		- 20
6	3822 Eutin	54°08'N 10°37'E		- 20
7	3835 Markelsdorf	54°32'N 11°04'E		- 20
8	6111 Bagø	55°18'N 9°48'E		- 18
9	6119 Kegnæs	54°51'N 9°59'E	23	15 18 21
10	6122 Skarup	55°06'N 10°41'E	49	- 18
11	6139 Kelds Nor	54°44'N 10°44'E	8	15 18 21
12	6144 Maribo	54°42'N 11°27'E	5	- 18
13	6147 Kadetrenden	54°47'N 12°45'E		15 18 21
14	6151 Omø	55°10'N 11°08'E	2	15 18 21
15	10006 Fehmarnbelt	54°36'N 11°09'E	4	15 18 21
16	10033 Meierwik	54°50'N 9°30'E	27	15 18 21
17	10034 Eggebeck	54°38'N 9°21'E	20	15 18 21
18	10035 Schleswig	54°32'N 9°33'E	43	15 18 21
19	10037 Jagel	54°28'N 9°31'E	22	15 18 21
20	10038 Hohn	54°19'N 9°32'E	10	15 18 21
21	10041 Kalkgrund	54°50'N 9°53'E	13	15 18 21
22	10044 Kiel Leuchtturm	54°30'N 10°16'E	21	15 18 21
23	10046 Holtenau	54°23'N 10°09'E	31	15 18 21
24	10151 Dahmeshöved	54°12'N 11°06'E	8	15 18 21
25	10156 Lübeck	53°53'N 10°42'E	13	15 18 21

Tabelle 1: Stationen in und um die Kieler Bucht Teil I

Nr.	Name	Wind- richt.	Wind- stärke	Druck	Temp.	Feuchte- einheit	Feuchteart
1	Meßboje KIBU 76	Grad	cm/sec	-	1/100°C	1/100°C	Feuchtttemperatur
2	Taars	Grad	cm/sec	-	1/100°C	-	-
3	Stoltebüll	45°	Bft	-	1/100°C	°C	Taupunkt
4	Neuland	45°	Bft	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
5	Plön	45°	Bft	-	°C	°C	Taupunkt
6	Eutin	45°	Bft	-	°C	°C	Taupunkt
7	Markelsdorf	45°	Bft	-	°C	°C	Taupunkt
8	Bagß	10°	Kt	-	°C	°C	Taupunkt
9	Kegnæs	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
10	Skarup	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
11	Kelds Nor	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
12	Maribo	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
13	Kadetrenden	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
14	Omø	10°	Kt	-	°C	°C	Taupunkt
15	Fehmarnbelt	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
16	Meierwik	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
17	Eggebeck	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
18	Schleswig	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
19	Jäger	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
20	Hohn	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
21	Kalkgrund	10°	Kt	1/10 mb	1/10°C	1/10°C	Taupunkt
22	Kiel Leuchtturm	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
23	Holtenau	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt
24	Dahmeshöved	Grad	Kt	1/10 mb	°C	%	Relative Feuchte
25	Lübeck	10°	Kt	1/10 mb	°C	°C	Taupunkt

Tabelle 2: Stationen in und um die Kieler Bucht Teil II

## 4. DATENMATERIAL

### 4.1. Stationen

In den Tabellen 1 und 2 sind die 25 Stationen aufgeführt, deren Messungen für die Analysen benutzt wurden,

Sie lassen sich nach Beobachtungsterminen und Meßgenauigkeit in sechs Gruppen unterteilen:

1. Meteorologische und ozeanographische Meßprojekte
2. Synoptische Stationen mit stündlichen Beobachtungen
3. Synoptische Stationen mit 3-stündigen Beobachtungen
4. Synoptische Stationen mit 3-stündigen Beobachtungen ohne Nachttermine
5. Automatische Stationen
6. Klimastationen

Zur Gruppe 1 gehört die Meßboje "SYLVIA" des Projektes "KIBU 76". Mit dieser Meßboje, die fest auf dem Grund der Kieler Bucht verankert war, wurden alle 4 Minuten neben anderen Parametern, Wind, Temperatur und Feuchttemperatur in vier verschiedenen Höhen registriert. Für die Analysen wurden alle drei Stunden, zu den synoptischen Terminen, die Temperatur und Feuchttemperatur aus Höhe 3 benutzt, während aus den Windmessungen in Höhe 4 alle drei Stunden ein 12-Minutenmittel gebildet wurde. Höhe 3 entspricht einer Höhe von 4 Metern und Höhe 4 einer Höhe von 7,5 Metern über dem mittleren Wasserspiegel.

Weitere Informationen über "KIBU 76" sind im Datenband enthalten (Literaturverzeichnis).

Zur Gruppe 2 gehören: Meierwik, Eggebeck, Schleswig, Jagel und Hohn. Von diesen Stationen lagen die Messungen stündlich vor. Zudem waren die Temperatur und Taupunkttemperatur in Zehntel Grad Celsius, und damit genauer als im Synop-Schlüssel vorgesehen, angegeben.

Benutzt wurden zwar nur die Messungen zu den synoptischen Terminen, jedoch konnten die dazwischen liegenden Messungen zur Interpolation benutzt werden, falls ein Datenausfall zu einem synoptischen Termin auftrat.

Die Gruppe 3 ist mit 12 Stationen die größte. Sie umfaßt alle Stationen, die an allen acht Terminen beobachteten, und deren Daten im Synop-Schlüssel, und damit auch in beschränkter Genauigkeit vorliegen.

Die Stationen Maribo, Bagø und Lübeck aus Gruppe 4 melden ebenso wie die synoptischen Stationen aus Gruppe 3, sind jedoch nachts nicht besetzt. Dadurch fallen je nach Monat und Station 1 bis 4 Termine pro Tag aus.

Die Daten von Kiel Leuchtturm und Dahmeshöved wurden von Automaten geliefert. Sie liegen auch zu den synoptischen Terminen vor, sind aber in der Meßgenauigkeit sehr zweifelhaft. Außerdem machte eine Vielzahl von Übermittlungsfehlern und Ausfällen die Bearbeitung sehr schwierig.

Die Klimastationen der Gruppe 6 sind für objektive Analysen der gewünschten Genauigkeit nur begrenzt tauglich. Ihre Berücksichtigung empfiehlt sich nur, wenn nicht genügend Stationen aus dem synoptischen Netz vorhanden sind, wie im vorliegenden Fall.

Aus den Tabellen 1 und 2 und der Klassifizierung läßt sich ersehen, wie stark die Qualitätsunterschiede unter den Stationen sind. Für eine Analyse in einem so kleinen Gebiet, wie der Kieler Bucht, ist es aber nicht möglich, auf einige der Stationen zu verzichten, wie man es sicher bei einer größeren Anzahl tun würde.

Führt man für die Stationen Gewichte ein, so kann erreicht werden, daß der Einfluß der Klimastationen und Automaten verringert wird, so daß die Meßungenauigkeiten durch das Verfahren hinweggeglättet werden.

Dagegen wird den sehr genauen Meßstationen ein höheres Gewicht gegeben.

Als weitere Ungenauigkeit muß noch in Kauf genommen werden, daß Klimatermine und synoptische Termine sich abends und mittags um eine Stunde unterscheiden. Die Messungen der Klimastationen wurden trotzdem zu den nächstgelegenen Synop-Terminen gezählt.

#### *4.2. Datenaufbereitung*

In Tabelle 3 ist der Gang der Datenaufbereitung dargestellt. Die Originaldaten lagen teils auf Magnetband und teils in Listenform vor. In der ersten Phase der Aufbereitung war es deshalb notwendig, alle Daten auf das gleiche Format zu bringen. Als Einheiten wurden Knoten, Millibar, Grad Celsius und, für die spezifische Feuchte, Gramm pro Kilogramm benutzt. Um nicht an Genauigkeit zu verlieren, wurden auch noch zwei Stellen nach dem Dezimalpunkt berücksichtigt. Im gleichen Arbeitsgang mit der Umformung in die Standardeinheiten, erfolgte die Zerlegung des Windvektors in seine zwei skalaren Komponenten (u-Komponente positiv von West nach Ost, v-Komponente positiv von Süd nach Nord) und die Umrechnung der verschiedenen Feuchtemeßgrößen in die spezifische Feuchte.

Nachdem alle Daten nach Stationen und Terminen geordnet zur Verfügung standen, wurden sie durch ein Rechenprogramm nach Plausibilität und - soweit vorhanden - hinsichtlich der Druckänderung und Drucktendenz kontrolliert. Es wurde untersucht, ob die Messungen in einem vorgegebenen Intervall liegen, und ob die Änderungen von Termin zu Termin an derselben Station einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten. Die benutzten Intervalle und maximal erlaubten Änderungen sind in Tabelle 3 enthalten. Traten Überschreitungen

Meßwert	Umrechnung in	Einheit	Bereich, in dem die Meßwerte liegen	zulässige max. Änderung
Windrichtung	→ U-Komponente	Kt	0 30	-
Windstärke	→ V-Komponente	Kt	0 30	-
Druck	→ Druck	mb	970 1050	Druckänderung & Tendenz
Temperatur	→ Temperatur	°C	-5 35	7
Feuchte	→ Spezifische Feuchte	g/kg	2 20	3

Tabelle 3:

*Datenaufbereitung*

Anzahl der Stationen : 25  
 Parameter pro Station und Termin : 5  
 Zeitraum : 1-APR-76 - 31-OCT-76  
 214 Tage = 1712 Termine  
 Totale Anzahl der Meßwerte : 214000

*Verarbeitungsfolge*

1. Umrechnung
2. Kontrolle der Absolutwerte
3. Kontrolle der dreistündigen Änderung
4. Interpolation
5. Umspeicherung

auf, so wurde der falsche Wert nach einer weiteren Sichtkontrolle gelöscht und - falls möglich - durch Interpolieren ersetzt.

#### *4.3. Datenausfall und Interpolation*

Um das Datenmaterial noch besser auszunutzen, wurden in einigen Fällen Interpolationen vorgenommen. Bedingung war, daß zu einem fehlenden Wert, die Messungen derselben Station zum Termin vor und nach dem Ausfall vorhanden waren. In diesem Fall wurde zwischen den beiden Terminen linear interpoliert. Es wurden also jeweils nur zeitliche Interpolationen über den Zeitraum von 6 Stunden an Stationen durchgeführt. Eine räumliche Interpolation unter Zuhilfenahme benachbarter Stationen wurde in keinem Fall vorgenommen, um die Analyse nicht zu beeinflussen. Die zeitliche Interpolation dagegen liefert für Termine, an denen es Ausfälle gab, zusätzliche Werte. Dies schien auf jeden Fall nützlicher, als auf diese Werte ganz zu verzichten.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Zahl der vorgenommenen Interpolationen:

Tabelle 4:

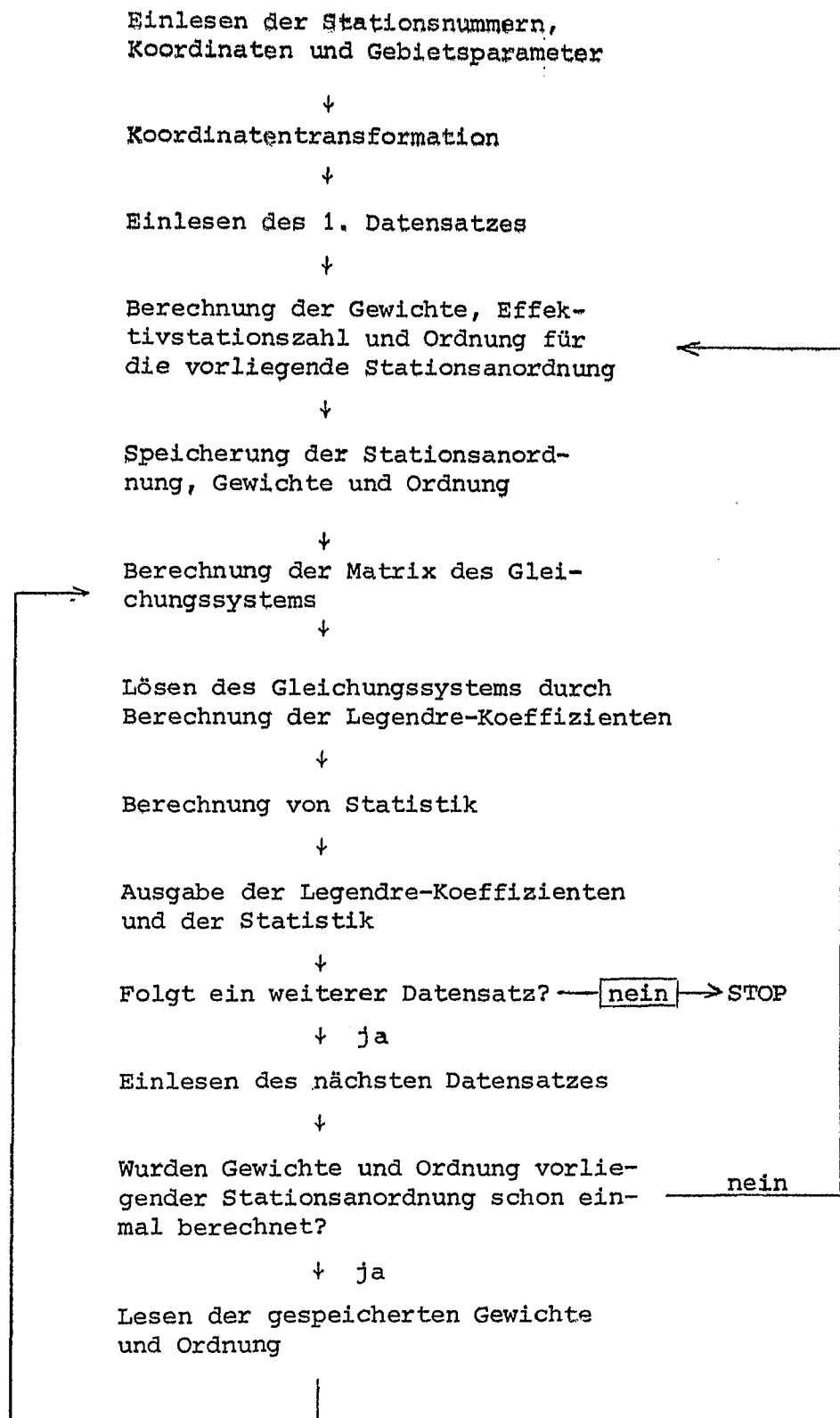
Grund des Ausfalls	Fehlende Werte	interpolierbar	Nicht interpolierbar
Keine Beobachtung	295	35	260
Unregelmäßige Ausfälle	5	4	1
Falsche Werte	2	2	0

Die Zahlen beziehen sich auf einen durchschnittlichen Tag mit 1000 Daten.



## 5. ANALYSEPROGRAMM

### 5.1. Blockdiagramm des Analyseprogramms



### 5.2. Kurzbeschreibung des Analyseprogramms

Das Programm wurde an der Rechenanlage der Universität Kiel erstellt.

<i>Computer:</i>	PDP-10
<i>Sprache:</i>	DECsystem-10 ALGOL
<i>Besonderheiten:</i>	Externe Prozeduren
<i>Speicherbedarf:</i>	30 K Core bei 25 Stationen
<i>Rechenzeit:</i>	60 sec für eine einzelne Analyse 5 sec für jede weitere Analyse mit gleicher Stationsanordnung

Das Programm wurde in DECsystem-10 ALGOL, einer komfortablen Modifizierung von ALGOL-68, geschrieben. Insbesondere erlaubt diese Sprache eine Aufteilung des Programms in voneinander unabhängige Segmente, die einzeln getestet oder auch gegen neue Versionen ausgetauscht werden können. So entspricht jeder Block im Diagramm einem solchen Segment. Es ist somit leicht möglich, z.B. die Dateneingabe oder die Koordinatentransformation zu ändern, indem die entsprechende externe Prozedur durch eine neu geschriebene ausgetauscht wird. Andere Programmteile bleiben in jedem Fall davon unbeeinflusst.

Nach Einlesen der Gebietsparameter, die das Rechteck beschreiben, sowie der Stationsnummern und Koordinaten, wird die Koordinatentransformation derart durchgeführt, daß der Ursprung des neuen Koordinatensystems im Mittelpunkt des Rechtecks liegt. Die längere Seite des Rechtecks erhält die Länge 2 Einheiten. Die entsprechenden Eckpunkte haben dann als eine der Koordinaten 1 oder -1. Beim Einlesen des Datensatzes werden nur jene Stationen berücksichtigt, von denen eine Messung vorliegt. Diese bilden dann eine Anordnung, die gespeichert wird. Für die gegebene Anordnung wird eine Gewichtsrechnung nach FECHNER (1977) durchgeführt. Da diese Ge-

wichtsberechnung über 90 % der Rechenzeit für eine Analyse beansprucht, werden die Ergebnisse ebenfalls gespeichert, um später bei dem erneuten Auftreten der Anordnung wieder verwendet werden zu können. Aufgrund der Gewichtsverteilung wird die Effektivstationszahl berechnet und die Ordnung der Analyse bestimmt. Die maximal mögliche Ordnung kann durch Parameter vor dem Rechenlauf festgesetzt werden.

Mit Hilfe der Meßwerte, Gewichte und der im Programm enthaltenen Legendre'schen Polynome wird die Matrix des Gleichungssystems und der Ergebnisvektor besetzt.

Dieses Gleichungssystem wird im darauffolgenden Segment nach der Methode Aitken mit doppelter Pivotsuche gelöst, beschrieben in STOER (1970). Um die Rundungsfehler klein zu halten, wird hier mit der doppelten Genauigkeit von 16 Dezimalstellen gerechnet. Durch die variable Ordnung ist sicher gestellt, daß die Matrix nicht singulär und das Gleichungssystem damit unlösbar wird. Nach Durchlaufen dieser Prozedur sind die Legendre-Koeffizienten berechnet, und können ausgegeben werden. Die Ausgabe erfolgt immer auf die Magnetplatte. Zur Kontrolle der Analyse werden in einem Statistiksegment noch für jede Station die Abweichung des Funktionswertes vom Meßwert berechnet, sowie die gewichtete quadratische Abweichung. Tabelle 7 zeigt die berechneten Größen für ein Beispiel.

Daraus kann die mittlere Abweichung  $\sigma$  berechnet werden, die ein Maß für die Anpassung der Funktion an die Meßwerte darstellt. Sie läßt sich mit anderen Analysen jedoch nur bei gleicher Stationsanordnung und Ordnung vergleichen. Nach Ausgabe der Statistik ist die Analyse des Datensatzes beendet, und der nächste wird, soweit vorhanden, eingelesen. Kontrollzahlen zum Anfang und Ende jedes Datensatzes ermöglichen das Erkennen von Lesefehlern. Die Stationsanordnung des neuen Datensatzes wird geprüft und wenn der Fall gespeichert ist,

erfolgt sofort die Berechnung der Matrix, andernfalls erfolgt ein Sprung zur Prozedur der Gewichts Berechnung.

Da im Programm bis zu 16 verschiedene Anordnungen gespeichert werden, sind meist nach der Analyse aller acht Termine eines bestimmten Tages alle Anordnungen berechnet. Neue müssen nur berücksichtigt werden, wenn die Anordnung durch unregelmäßige Datenausfälle geändert wird.

Alle im Programm berechneten Größen werden zum Schluß des Programms ebenfalls auf Platte geschrieben, und stehen somit zur weiteren Verwendung zur Verfügung.

## 6. NUMERISCHE INSTABILITÄTEN

Trotz Verwendung der Effektivstationszahl zur Bestimmung der optimalen Ordnung, zeigten sich in vielen Analysen starke Instabilitäten. Abb. 3 zeigt ein typisches Beispiel hierfür. Es handelt sich um die Temperaturanalyse am 1. April 1976 12.00 Uhr GMT. Die Stationsanordnung erlaubte eine Funktion 4. Ordnung. Der 1. April war wolkenlos. Durch die Sonneneinstrahlung hatte sich deshalb bis Mittag das Land stellenweise bis auf  $17^{\circ}\text{C}$  erwärmt, während die Luft über dem Wasser noch eine Temperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  hatte. Dieser scharfe Temperaturgradient an der Küste kann von der Funktion naturgemäß nicht so scharf wiedergegeben werden, da die Stationsdichte dies nicht zuläßt. Er bewirkt aber eine Drängung der Isothermen zwischen den See- und den Landstationen. In der Südostecke des Quadrates befand sich keine weitere Station mehr. Dadurch wurde bewirkt, daß der Trend von der Mitte der Kieler Bucht über die Küste fortgesetzt wurde. Dadurch zeigt die Abbildung in der Südostecke schon die  $27^{\circ}\text{C}$ -Isotherme, obwohl nirgends mehr als  $17^{\circ}\text{C}$  gemessen wurden. In der Nordostecke dagegen werden in einem ebenfalls stationsleerem Gebiet  $+1^{\circ}\text{C}$  angezeigt, was ebenfalls unglaublich ist.

Die Vermutung, die Ordnung sei zu hoch gewählt, erweist sich schnell als falsch bei Betrachtung der Abb. 4.

In dieser Abbildung ist die Analyse mit den gleichen Daten durchgeführt worden. Die Ordnung der Funktion wurde dagegen auf 3 erniedrigt. Es zeigt sich nicht einmal eine geringfügige Verbesserung der Analyse, sondern der Effekt wird sogar noch verstärkt. In dieser Analyse wird im Südosten eine Temperatur von  $35^{\circ}\text{C}$  angezeigt und im Nordosten gar  $-1^{\circ}\text{C}$ . Nur in den Gebieten größerer Stationsdichte ähneln sich die Bilder. Da diese Instabilität nur in den Ecken auftritt, bietet sich hier die Benutzung von fiktiven Hilfsstationen an. Es wurden deshalb außerhalb des Quadrates 4 solche Hilfsstationen definiert, die die Koordinaten  $(-1.1, -1.1)$   $(-1.1, +1.1)$   $(+1.1, +1.1)$   $(+1.1, -1.1)$  haben. Sie bekommen einen fiktiven Meßwert zugewiesen, der aus dem Mittel umliegender Stationen berechnet wird. Die Platzierung der Stationen außerhalb des Quadrates hat folgenden Effekt: Ist die Stationsdichte am Rand und in der Ecke ausreichend groß, so wird die Hilfsstation aufgrund der Gewichtsrechnung kein Gewicht erhalten, und somit in der Analyse nicht berücksichtigt werden. Fehlen im Eckgebiet dagegen Stationen, wird die Hilfsstation ein Gewicht erhalten. In der Analyse wird sie dann wie eine echte Station behandelt. Das Ergebnis dieser Methode zeigt Abb. 5. Wieder wurde der gleiche Termin analysiert. Diesmal aber wieder 4. Ordnung und unter Verwendung der 4 Hilfsstationen. In der Bildmitte zeigt sich wieder die Ähnlichkeit mit der ursprünglichen Analyse 4. Ordnung. In den Ecken dagegen ist deutlich der Einfluß der Hilfsstationen auszumachen. Es zeigen sich keine Stellen mehr, an denen Temperaturen auftreten, die aufgrund der Originalmessungen nicht glaubhaft sind. Die Wirkung dieser Hilfsstationen wurde in vielen Fällen analog zu den gezeigten Abbildungen über-



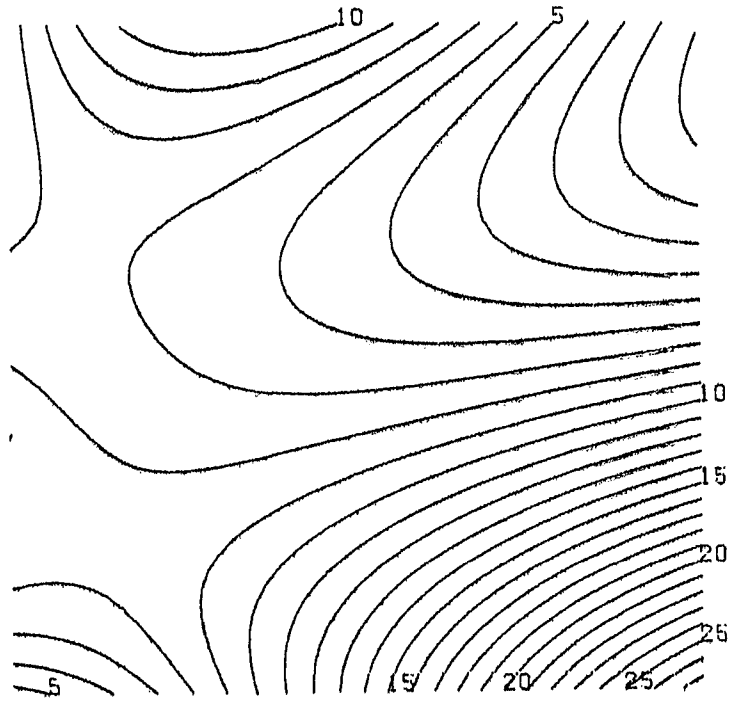


Abb. 3 Instabile Analyse  
Temperatur 1. April 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 23 Hilfsstationen: 0  
ESZ: 16 Ordnung: 4  $\sigma: 0,8^{\circ}\text{C}$

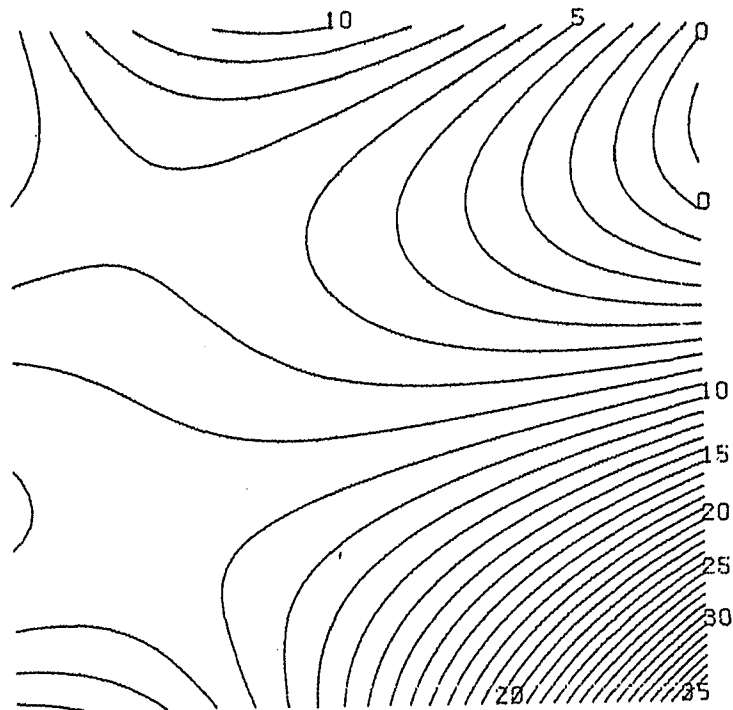


Abb. 4 Instabile Analyse bei verminderter Ordnung  
Temperatur 1. April 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 23 Hilfsstationen: 0  
ESZ: 16 Ordnung: 3  $\sigma: 0,9^{\circ}\text{C}$

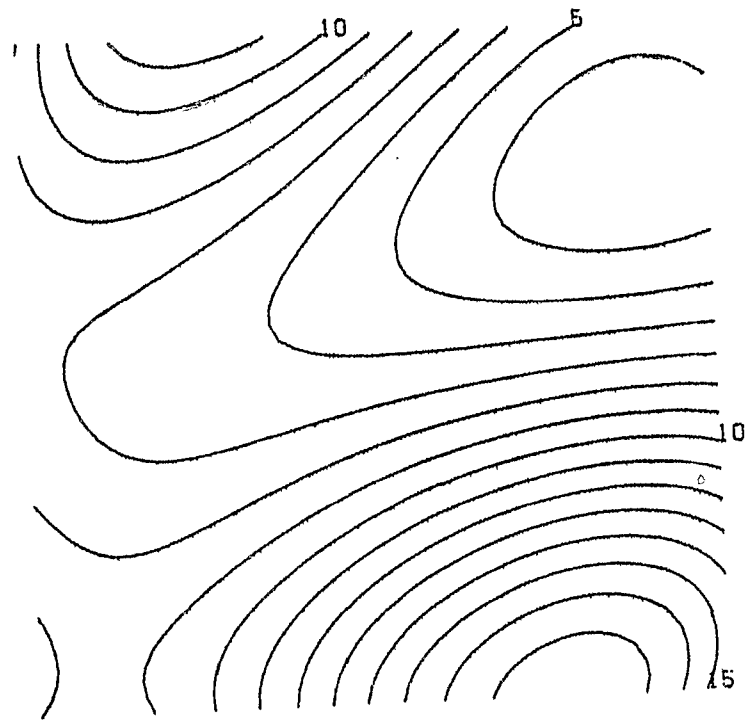


Abb. 5      Stabilisierte Analyse mit Hilfsstationen  
Temperatur 1. April 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 23    Hilfsstationen: 4  
ESZ: 19      Ordnung:       $\sigma: 0,8^{\circ}\text{C}$



prüft. Da sich keine negativen Effekte einstellten, wurden sie deshalb als fester Bestandteil in das Analysenprogramm einbezogen.

## 7. ANALYSE VERSCHIEDENER METEOROLOGISCHER GRÖSSEN

Theoretisch läßt sich das Analyseverfahren gleichermaßen für alle skalaren Größen anwenden. Die Praxis zeigt jedoch, daß den verschiedenen Eigenschaften der zu analysierenden Größe Rechnung getragen werden muß. So muß man z.B. bei der Analyse der Windkomponenten mit einer großen Veränderlichkeit und großen Ungenauigkeit rechnen. Das Temperaturfeld weist zwar eine hohe Genauigkeit der Messungen auf, hier wird jedoch immer die Orographie die Analyse stark beeinflussen. Das Druckfeld sollte eigentlich am leichtesten zu analysieren sein, da es in einem kleinen Gebiet relativ glatt verläuft. Doch völlig unerwartet entspricht die Meßgenauigkeit im Druck längst nicht den Erwartungen. Auf den folgenden Seiten wird deshalb jede meteorologische Meßgröße speziell diskutiert. Außerdem werden jeweils ausgesuchte Analysen gezeigt, in denen die Besonderheiten der Größe zu Tage treten.

### *7.1. Darstellung der Felder*

Die Darstellung der skalaren Felder erfolgt durch Isoplethen. Es ist möglich, diese Isoplethen maschinell zu plotten, wie in den Abb. 3 bis 5. Für dieses Kapitel wurde jedoch eine andere Darstellung gewählt. In den Abb. 15 bis 30 wurde ein Lineprinter benutzt.

Die Seite stellt das Gebiet dar, für das die Analyse erfolgte. Da sie rechteckig ist, wurden oben und unten ein Streifen vom Quadrat nicht berücksichtigt. Für jede Stelle der Seite, auf die ein Symbol gedruckt werden kann, wurde jetzt eine Abfrage durchgeführt, ob

der Funktionswert innerhalb eines Intervalles ( $X-0.25$ ,  $X+0.25$ ) einer beliebigen Isoplethe  $X$  liegt. War dies der Fall, so wurde an dieser Stelle die letzte Ziffer des Isoplethenwertes ausgedruckt, anderenfalls blieb die Stelle leer. So entsteht z.B. statt der  $7^{\circ}\text{C}$ -Isotherme ein Band, auf dem das Symbol 7 ausgedruckt ist. Dieses Band bedeckt das Gebiet, in dem die Funktion eine Temperatur zwischen  $6,75$  und  $7,25^{\circ}\text{C}$  errechnet. Allerdings würden auch die  $17^{\circ}\text{C}$  und  $-7^{\circ}\text{C}$ -Isothermen gleichermaßen dargestellt. Deshalb wird an den senkrechten Rändern der Seite noch einmal der Funktionswert der Randpunkte als volle Zahl ausgedruckt, so daß eine eindeutige Zuordnung der Werte erfolgen kann. Diese Darstellung bietet verschiedene Vorteile. Zum einen kann die gleichzeitige Darstellung mit der Landkarte erfolgen, ohne daß die Erkennbarkeit des Feldes darunter leidet. Zum anderen bietet dieses Verfahren ein anschauliches Bild für den Gradienten, der durch die Breite der Bänder charakterisiert wird. Auch in Hinsicht auf den Aufwand von Rechenzeit und Plotzeit ist die Darstellung auf dem Drucker vorzuziehen. Für die Darstellung der Vektorfelder ist es sinnvoll, ein Gitter über das Gebiet zu legen und an jeden Gitterpunkt den Windvektor aufzutragen. Der Pfeil zeigt in die Richtung, in die der Wind weht, die Länge des Pfeilschaftes ist ein Maß für die Windstärke. In den folgenden Darstellungen wurde ein  $30 \times 30$  Gitter gewählt. Das entspricht einer Entfernung von 4 km zwischen zwei Gitterpunkten.

## 7.2. *Artspezifische Effekte und Ergebnisse*

### 7.2.1. Druckanalyse

Von allen analysierten meteorologischen Größen warf der Druck überraschend die größten Probleme auf. Schon die ersten Analysen zeigten eine überaus große mittlere quadratische Abweichung (mit  $\sigma$  bezeichnet). Der Wert schwankte um 1 mb, und dies bei einer angenommenen Meßgenauigkeit von 0,1 mb. Außerdem mußte angenommen werden, daß sich der Druck besonders gut durch eine analytische Funktion annähern läßt, da die Flächen gleichen Drucks doch einen relativ glatten Verlauf nehmen. Dies wird man bei entsprechender Genauigkeit auch sicher finden, im vorliegenden Fall aber zeigt schon ein Blick in die Originaldaten die Ursachen. So geben z.B. dicht beieinander liegende Stationen wie Kiel-Holtenau und Kiel-Leuchtturm oder Schleswig und Jagel stark unterschiedliche Druckmessungen. Die Messungen zwischen Kiel-Leuchtturm und Kiel-Holtenau weisen im Durchschnitt eine Differenz von 5 mb auf, die Stationsentfernung beträgt 15 km. Für die Stationen Schleswig und Jagel gilt eine mittlere Differenz von 3 mb bei einer Entfernung von 7 km. In der Tabelle 6 sind Auszüge der Originaldaten dieser Stationen dargestellt. Bei den anderen Stationen mögen die Fehler ähnlich groß sein, doch ließ sich bei diesen vier Stationen der Fehler besonders leicht nachweisen.

Der reale Druckgradient über der Kieler Bucht wird dagegen um den Wert von 2 mb/100 km schwanken. Damit wird schon durch die Originaldaten gezeigt, daß für dieses Gebiet mit diesen Stationen eine objektive Analyse unmöglich ist.

Versucht man trotzdem eine Analyse, so ergibt sich ein Feld, daß im wesentlichen das Meßfehlerfeld (Abb. 6)

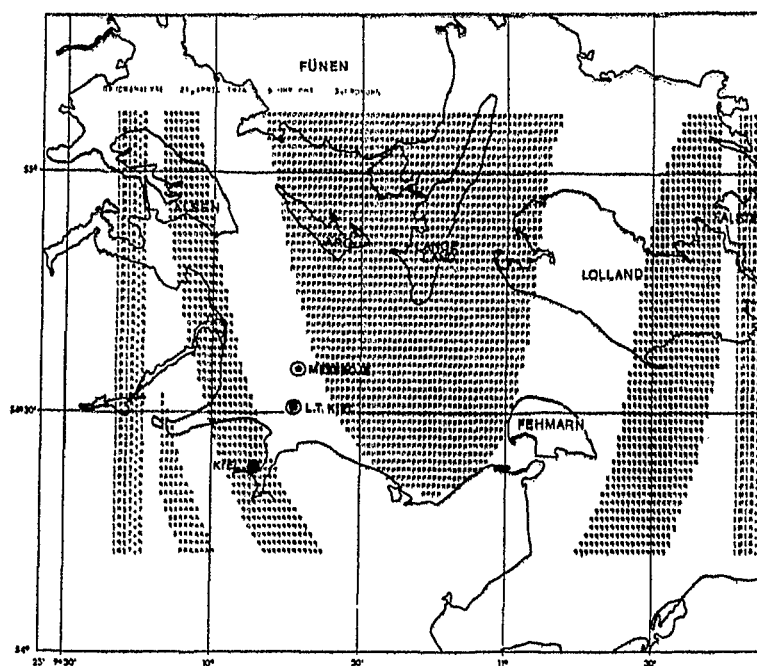


Abb. 6      Kleinräumige Druckanalyse  
 Druck 21. April 1976 6 Uhr GMT  
 Stationen: 14   Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 11      Ordnung: 3       $\sigma$ : 1.4 mb

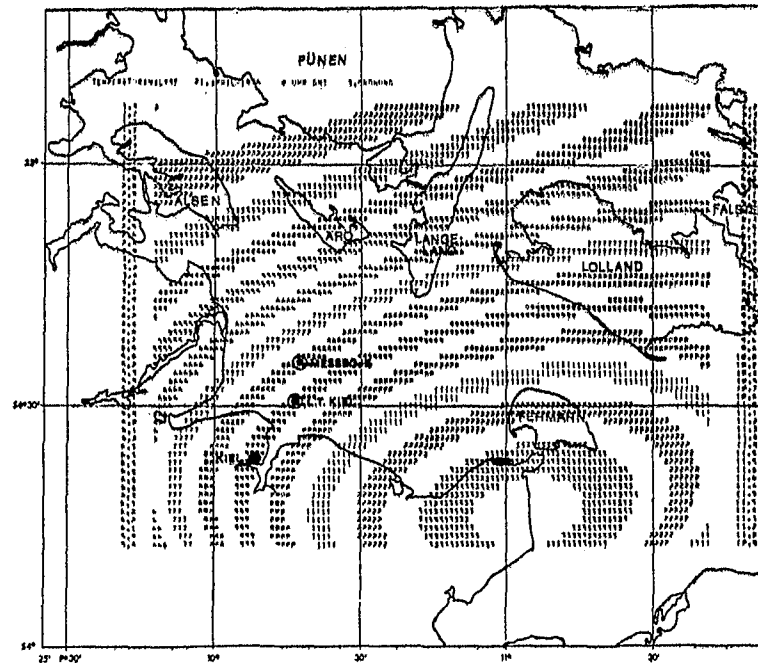


Abb. 7      Temperatur 21. April 1976 0 Uhr GMT  
 Stationen: 14      Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 12      Ordnung: 3       $\sigma: 0.4^{\circ}\text{C}$

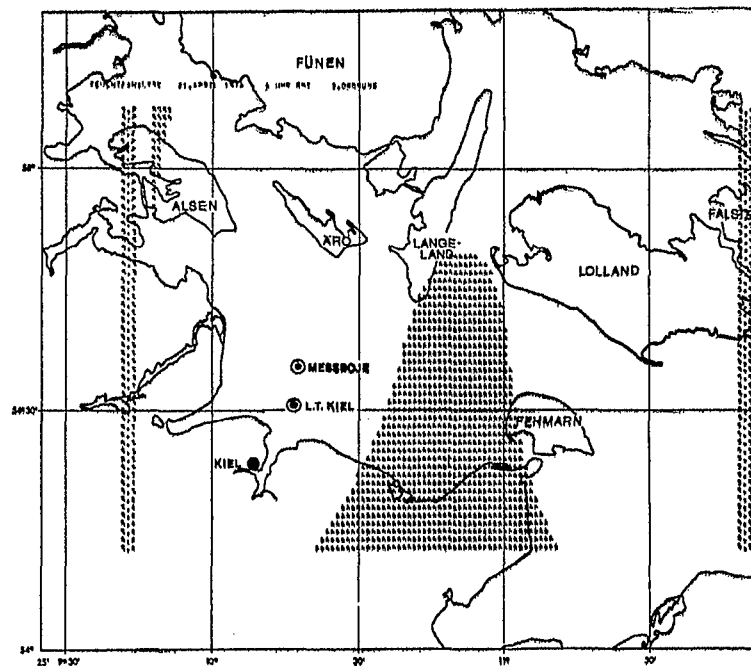


Abb. 8      Spezifische Feuchte 21. April 1976 6 Uhr GMT  
 Stationen: 22   Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 16      Ordnung: 3       $\sigma$ : 0.5 g/kg

Tabelle 6: Druckmessungen (mb) - Originaldaten

Uhrzeit	Schleswig	Jagel	Differenz	Kiel	Holtenau	Differenz 1. Juni 76
0	1008.4	1011.5	3.1	-	1010.5	
3	1008.3	1011.4	3.1	-	1010.4	
6	1008.4	1011.7	3.3	1015.8	1010.6	5.2
9	1008.2	1011.4	3.2	1015.8	1010.7	5.1
12	1007.8	1010.8	3.0	1015.2	1010.2	5.0
15	1006.6	1010.2	3.6	1014.8	1009.2	5.6
18	1006.3	1009.5	3.2	1014.1	1008.8	5.3
21	1006.6	1009.7	3.4	-	1008.8	
						30. Sept. 76
0	1011.9	1014.8	2.9	-	1014.3	
3	1012.6	1015.4	2.8	-	1014.9	
6	1013.2	1015.6	2.4	1019.8	1015.3	4.5
9	1014.1	1016.8	2.7	1020.7	1016.3	4.4
12	1014.6	1017.3	2.7	1021.1	1016.9	4.2
15	1014.6	1016.9	2.3	1021.5	1017.1	4.4
18	1015.0	1017.5	2.5	1021.9	1017.2	2.7
21	1014.6	1017.4	2.8	-	1017.2	

darstellt. Unabhängig von Wetterlage und Termin ähneln sich die Bilder. Lediglich die Benennung der Isobaren unterscheidet diese Felder. Leider bietet das Analysenverfahren nur die Möglichkeit, Fehler zu erkennen. Eine qualitative Bestimmung des Fehlers für einzelne Stationen ist nicht möglich, weil keine Aussage getroffen werden kann, wie sich die Fehlerdifferenz auf die zwei Stationen, deren Messungen sich widersprechen, aufteilt.

Die Druckfelder werden jedoch unbedingt benötigt, um den geostrophischen Wind zu bestimmen. Als Möglichkeit bot sich hier eine großräumige Druckanalyse mit Daten an, die nur aus dem synoptischen Netz stammen. Diesem Versuch war Erfolg beschieden (Abb. 13 u. 14).

Die Güte der großräumigen Analysen hat zwei Ursachen. Zum einen wurde durch die Vielzahl der Stationen eine Glättung der Analyse bewirkt. Die Fehlmessungen konnten die Analyse nicht mehr so stark beeinflussen. Zum anderen zeigen die Stationen des synoptischen Netzes eine deutlich höhere Qualität. Eklatante Abweichungen wie zuvor angeführt, traten bei diesen Stationen nicht mehr auf. Bezüglich des Drucks zeigen diese Untersuchungen also, daß nur Druckanalysen in größeren Gebieten sinnvoll sind. Erst bei Rechtecken mit Seitenlängen über 300 km können brauchbare Resultate erwartet werden.

#### 7.2.2. Temperatur

Für die Temperaturanalyse ist es von Vorteil, daß die Meßgenauigkeit der Thermometer sehr hoch ist. Man kann allgemein von einer Genauigkeit von  $0,1^{\circ}\text{C}$  ausgehen. Leider wird jedoch von den synoptischen Stationen diese Genauigkeit nicht weitergegeben, da der Synop-Schlüssel nur die Angabe von ganzen  $^{\circ}\text{C}$  zuläßt. Doch auch diese Genauigkeit genügt den Ansprüchen.

In den meisten Fällen wird das Temperaturfeld keinen glatten Verlauf nehmen. Störungen können auftreten durch kleinskalige Konvektionszellen und Fronten. Der Grad der täglichen Erwärmung wird stark vom vorhandenen Untergrund beeinflusst und ein veränderliches Windfeld kann durch Advektion zu großen Veränderungen führen.

Die aufgeführten Effekte machen allerdings die kleinskalige Temperaturanalyse erst interessant. Man kann z.B. an Tagen mit wolkenlosem Himmel die unterschied-



liche Erwärmung von Land und Wasser sichtbar werden lassen. In Kapitel 7.3.2. ist ein solcher Tag diskutiert. Auch eine Front mit ausgeprägtem Temperatursprung müßte gut darzustellen sein. Diese Situation lag aber zu keinem der Termine, zu denen bildliche Darstellungen angefertigt wurden, vor. Eine Untersuchung mit synthetischen Fronten zeigte aber, daß ein Temperatursprung von 2-3°C, die Front in der Darstellung deutlich werden läßt.

Allgemein kann gesagt werden, daß nach Einführung der stabilisierenden Hilfsstationen keine Probleme mehr bei der Temperaturanalyse auftraten. Dies ist auch der Tatsache zu verdanken, daß die Temperatur von sämtlichen Stationen gemessen wird, so daß für diese Analysen die größte Datenmenge vorliegt. Die Güte der Analysen wird durch ein durchweg kleines  $\sigma$  bestätigt. Der Wert schwankt um 0,4°C.

#### 7.2.3. Feuchte

In Hinsicht auf die spätere Verwendung in ozeanographischen Modellen wurde von den verschiedenen Feuchtegrößen die spezifische Feuchte für die Analyse ausgewählt. Folgende Umrechnungsformeln wurden benutzt, um die spezifische Feuchte  $q$  zu berechnen.

$$E(t) = 6.107 \exp(19.83 t / (273.16 + t)) \quad (13)$$

$t$  = Temperatur in |°C|

$E$  = Sättigungsdampfdruck der Temperatur  $t$  |mb|

Diese Formel wurde von der CLAUSIUS-CLAPEYRONschen Gleichung abgeleitet.

Die Zahlenwerte wurden aus den Annahmen

$L_v = 597 \text{ cal/g}$

latente Verdampfungswärme

$a_{fl} \ll a_d$

spezifische Volumina

fl = flüssig, d = dampfförmig

berechnet.

Mit Hilfe einfacher meteorologischer Beziehungen konnte der Dampfdruck  $e$  bestimmt werden. Bei Kenntnis des Taupunktes mit Formel (13), bei der Feuchttemperatur mit der Sprung'schen Psychrometerformel und bei der relativen Feuchte mit dem Sättigungsdampfdruck. Aus Dampfdruck und Druck errechnet sich dann die spezifische Feuchte  $q$  zu:

$$q = 0,622 \frac{e}{p - 0,378 e} \quad (14)$$

An Stationen, die zwar die Feuchte, nicht aber den Luftdruck messen, wurden die Luftdruckmessungen umliegender Stationen benutzt. Die Umrechnungen wurden alle schon während der Datenaufbereitung vorgenommen.

Die Feuchteanalysen zeigten interessanterweise eine starke Koppelung mit der Trockentemperatur. Bei hohen Temperaturen war in der Regel auch  $q$  groß und umgekehrt. Die flächenhafte Verteilung dagegen zeigte keine großen Veränderungen. Auch ein vielleicht zu erwartendes Feuchtemaximum über dem Wasser der Kieler Bucht trat nur selten auf. Am häufigsten zeigt sich die Situation, daß die Feuchte von West nach Ost zunimmt. Dies steht in völliger Übereinstimmung mit den Untersuchungen von SPETH und SKADE (1977). Diese zeigen nämlich für den Juli ein deutliches Maximum von  $q$  östlich der Kieler Bucht.

Die Feuchteanalyse zeigt ebenso wie die Temperaturanalyse eine hohe Qualität. Trotz der vielen Umrechnungen, Vernachlässigungen und Ungenauigkeiten (z.B. in der Angabe des Taupunktes) ergibt die Analyse ein harmonisches Bild, bei kleinem  $\sigma$  (ca. 0.2 g/kg).

#### 7.2.4. Wind

Die unterschiedliche Genauigkeit der Stationen machte sich bei den Analysen des Windfeldes am stärksten bemerkbar. Standen doch hier Klimastationen, die nur acht Windrichtungen kennen und die Windstärke in Bft angeben, den Meßprojekten gegenüber, welche die Richtung in Grad und die Stärke in cm/sec messen. Deshalb war es unerlässlich, die objektiven, im Programm ermittelten Stationsgewichte, für die Windanalyse abzuändern. Die Gewichte der Klimastationen wurden zu Gunsten der Meßprojekte verringert. Dies brachte aber auch eine Verkleinerung der ESZ mit sich. Doch dies fiel nicht ins Gewicht, da die maximale Ordnung der Windanalysen von vornherein auf 3 festgesetzt wurde. Das erleichtert das Vergleichen von verschiedenen Wetterlagen und erlaubt das Glätten der Felder. Wie in den Abb. 9 bis 11 gezeigt, reicht die dritte Ordnung völlig aus, um auch komplizierte Windfelder darzustellen. Positiv wirkt sich hier wieder der Einfluß der Hilfsstationen aus. Er verhindert, daß eine durch Meßungenauigkeit entstandene Differenz zwischen benachbarten Stationen als Trend interpretiert und in die stationsleeren Gebiete am Rand fortgesetzt wird.

Für den betrachteten Zeitraum vom April bis Oktober 1976 wurden insgesamt 1712 Windfelder berechnet. Diese Menge bietet viele verschiedene Wettersituationen, die noch eine weit intensivere Untersuchung ermöglichen. Für diese Arbeit wurden jedoch wegen des Aufwandes von Plotzeit und Papier nur 30 Felder geplottet. Die Auswahl erfolgte nach der Großwetterlage, die synoptischen Karten entnommen wurde. Schon diese kleine Teilmenge zeigt, daß sich die direkte Analyse des Windfeldes lohnt. Auf den Abb. 9 bis 11 werden drei unterschiedliche Felder präsentiert.

Abb. 9 zeigt eine Westwindlage mit einer mittleren Windstärke von 27 Kt. Das entspricht einer Windstärke von 6 bis 7 Bft. Erwartungsgemäß zeigen sich hier im Windfeld nur geringe Veränderungen. Im Gegensatz dazu steht Abb. 10. Trotz Windstärken zwischen 5 und 10 Kt zeigen sich erhebliche Änderungen. Das hängt mit dem Durchzug einer Warmfront durch das Analysegebiet zusammen. Die Front bewegt sich von Westen nach Osten und liegt zum betrachteten Termin etwa zwischen Skarup und Dahmeshöved.

Abb. 11 schließlich zeigt die *Kieler Bucht* unter Hochdruckeinfluß. Die Großwetterlage zeigt ein ausgedehntes Hoch mit Kernen über dem westlichen Rußland und Schweden. Ein Keil erstreckt sich bis zu den Alpen. Über der Kieler Bucht zeigt das Windfeld ein langgestrecktes Flautengebiet. Aus dieser Zone wird zu allen Seiten ein Ausströmen angezeigt. Am Südrand des Gebietes werden schon Geschwindigkeiten von 6 Kt erreicht. Interessant ist auch, daß das Ausströmen antizyklonal erfolgt. Ähnliche Situationen werden im nachfolgenden Kapitel ausführlich diskutiert. Diese drei Bilder zeigen aber auf eindrucksvolle Weise die Kompliziertheit der Vorgänge über der Kieler Bucht.

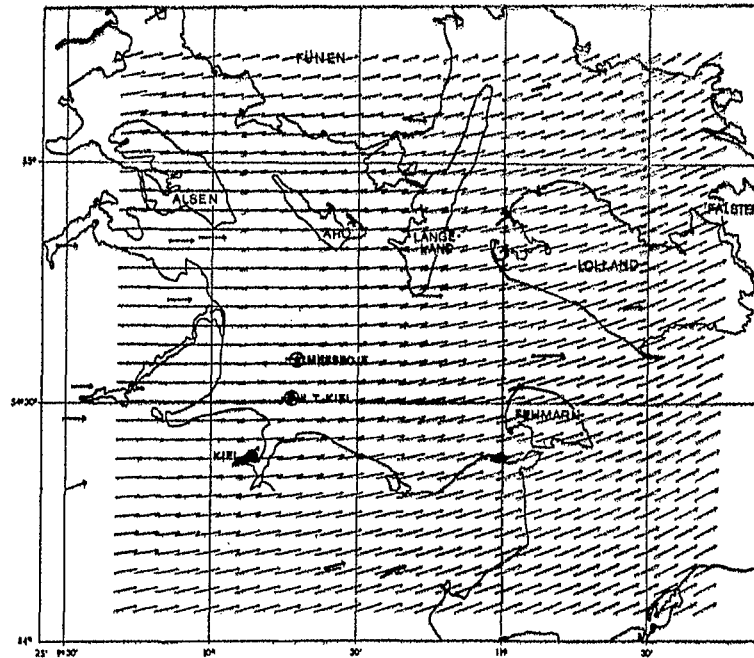


Abb. 9      Wind 4. Mai 9 Uhr GMT  
 Stationen: 22    Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 17          Ordnung: 3       $\sigma_u$ : 5.7 Kt  $\sigma_v$ : 4.8 Kt

Die Stationsmessungen sind durch  
 stärker gezeichnete Pfeile markiert.

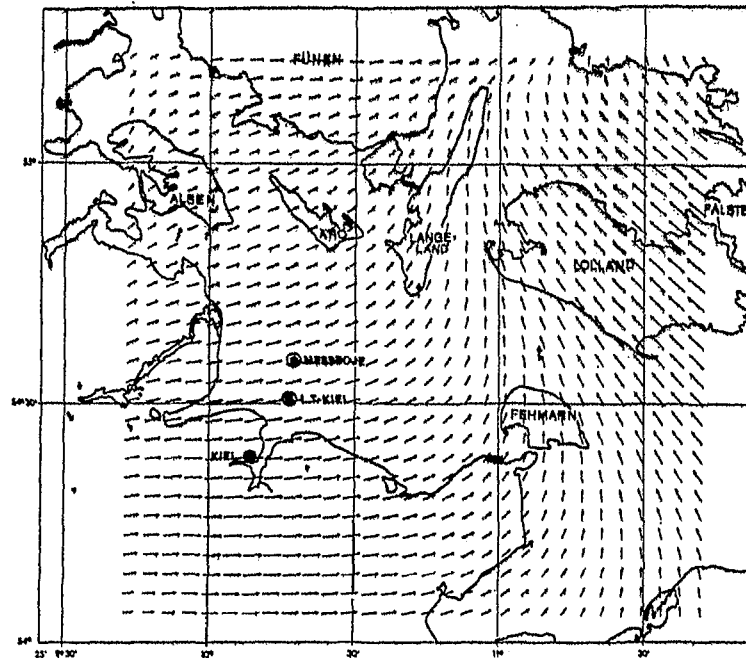


Abb. 10 Wind 25. Juni 0 Uhr GMT  
Stationen: 15 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 13 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 5.1 Kt  $\sigma_v$ : 2.5 Kt  
Die Stationsmessungen sind durch  
stärker gezeichnete Pfeile markiert.

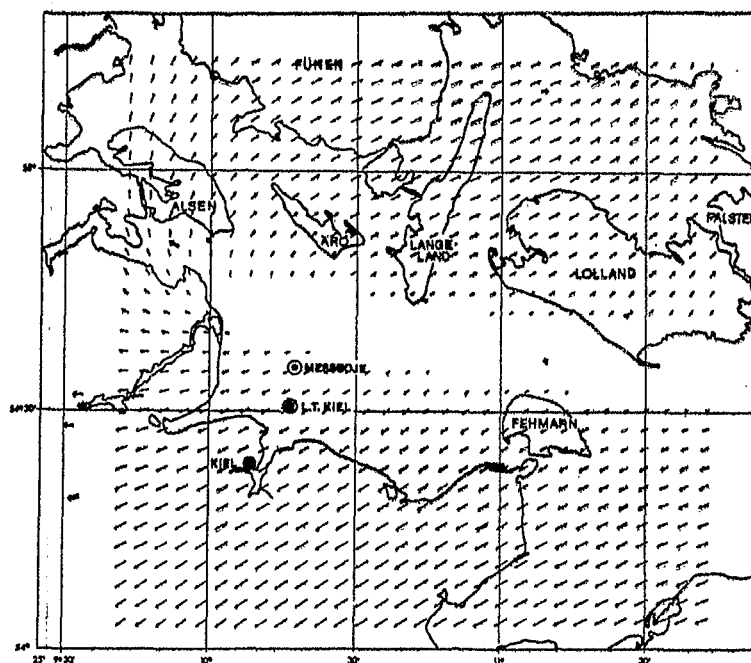


Abb. 11 Wind 13. April 15 Uhr GMT  
 Stationen: 17 Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 4 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 3.4 Kt  $\sigma_v$ : 2.1 Kt

Die Stationsmessungen sind durch  
 stärker gezeichnete Pfeile markiert.

### 7.3. Analysen des 26. Juni 1976

Das Ziel der Arbeit besteht hauptsächlich in der Entwicklung des Verfahrens und seiner Anwendung auf die im Jahre 1976 gesammelten Daten. Deshalb kann hier nur ein kleiner Teil der Ergebnisse präsentiert werden. Es wäre nun einfach, nur solche Felder zu zeigen, die von der Analysefunktion mühelos erfaßt wurden. Da die Leistungsfähigkeit des Verfahrens aber nur in schwierigen Fällen geprüft werden kann, wurde für die Darstellung in dieser Arbeit eine Wettersituation ausgesucht, die höchste Anforderungen an eine objektive Analyse stellt. Der 26. Juni 1976 wurde ausgesucht, weil die synoptische Wetterkarte (Abb. 12) zu diesem Termin eine Hochdrucklage zeigt. Das Hoch liegt an diesem Tag mit dem Kern über Polen, über der Kieler Bucht werden ca. 1026 mb gemessen. Ein im Gebiet durchweg wolkenloser Himmel sorgt für eine starke Einstrahlung tagsüber. Das Windfeld in der synoptischen Karte sieht im Raum der Ostsee chaotisch aus, was die Windrichtung betrifft. Die Windstärken sind alle gering. Es kann mit ziemlicher Sicherheit gesagt werden, daß solch eine Wetterlage die Grenzen einer objektiven Analyse aufzeigt. Andere Wetterlagen werden entsprechend besser in einer Analyse erfaßt werden können.

Zu allen acht Terminen dieses Tages werden im folgenden die Felder von Temperatur, spezifischer Feuchte und Wind gezeigt.



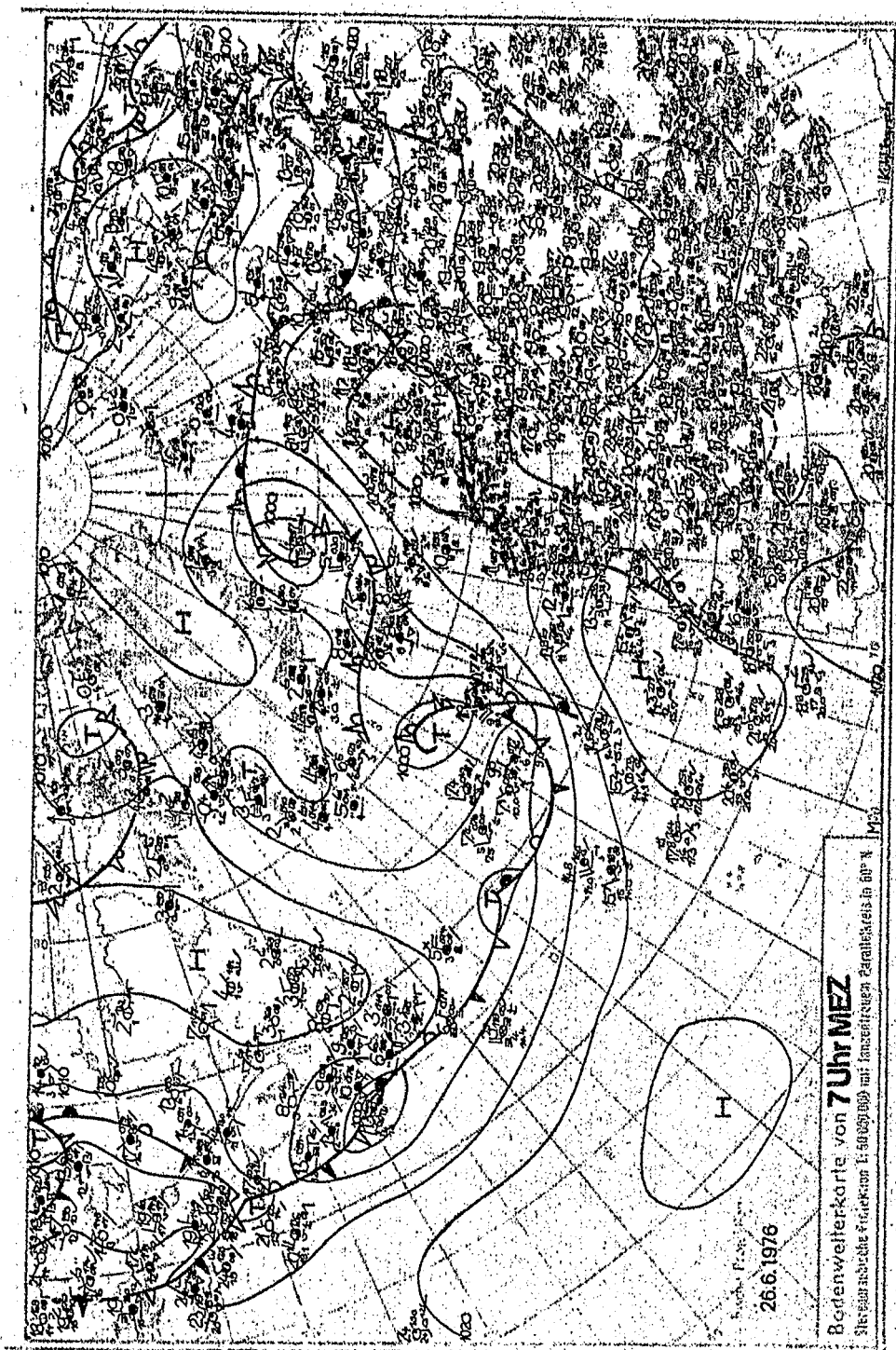


Abb. 12 Großwetterlage am 26. Juni 1976

### 7.3.1. Druck

Durch die Druckfelder (Abb. 13 und 14) wird noch einmal bestätigt, daß zu dem gewählten Termin über der Kieler Bucht nur schwache Luftdruckgegensätze herrschen. Die Abbildung 13 zeigt das Feld des gesamten Analysegebiets, einem Quadrat von 400 km Seitenlänge. Das für alle anderen Analysen benutzte 120 km-Quadrat ist in Abb. 14 kenntlich gemacht.

Aus den Feldern wird ersichtlich, daß für solche Wetterlagen eine Berechnung des geostrophischen Windes nicht sinnvoll ist. Die Analyse des realen Windes dagegen führt trotzdem zu guten Ergebnissen.

Es kann hier also festgestellt werden, daß sowohl auf die kleinräumige, ungenaue, als auch auf die aufwendige großräumige Druckanalyse verzichtet werden kann, weil alle benötigten Felder der im Modell benötigten Parameter trotzdem berechnet werden können.

### 7.3.2. Temperatur

Die Abb. 15 bis 22 zeigen die acht Temperaturfelder des 26. Juni, beginnend mit dem Termin 0 Uhr GMT. Dieses Feld zeigt nur schwache Temperaturgegensätze. Von 18°C im Norden nimmt sie auf 20°C im Süden zu. Um 3 Uhr (Abb. 16) ist die Luft noch etwas kühler geworden. 17°C im Nordwesten stehen 19°C im Südosten gegenüber. Nach dem Sonnenaufgang um 5 Uhr zeigt das 6 Uhr-Feld (Abb. 17) schlagartig ein anderes Bild. Während über dem Wasser nur eine schwache Erwärmung von 1°C erfolgte, zeigen die Landgebiete im Süden schon Temperaturen über 20°C. Diese Erwärmung setzt sich weiter fort. Um 9 Uhr (Abb. 18) hat sich über dem Wasser der Kieler Bucht ein deutliches Temperaturminimum gebildet. Die 21°C und 22°C-Isothermen deuten grob die Konturen der Küste an. Von diesem Zeitpunkt an beginnen die Schwierigkeiten für die objektive Analyse.

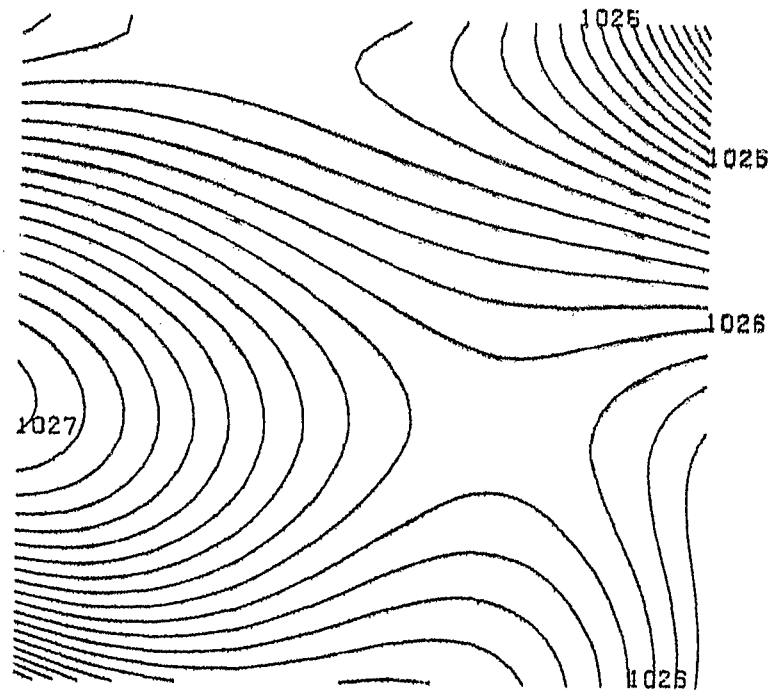


Abb. 13      Großräumige Druckanalyse 26. Juni 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 64   Hilfsstationen: 2  
ESZ: 38      Ordnung: 3       $\sigma$ : 0.6 mb

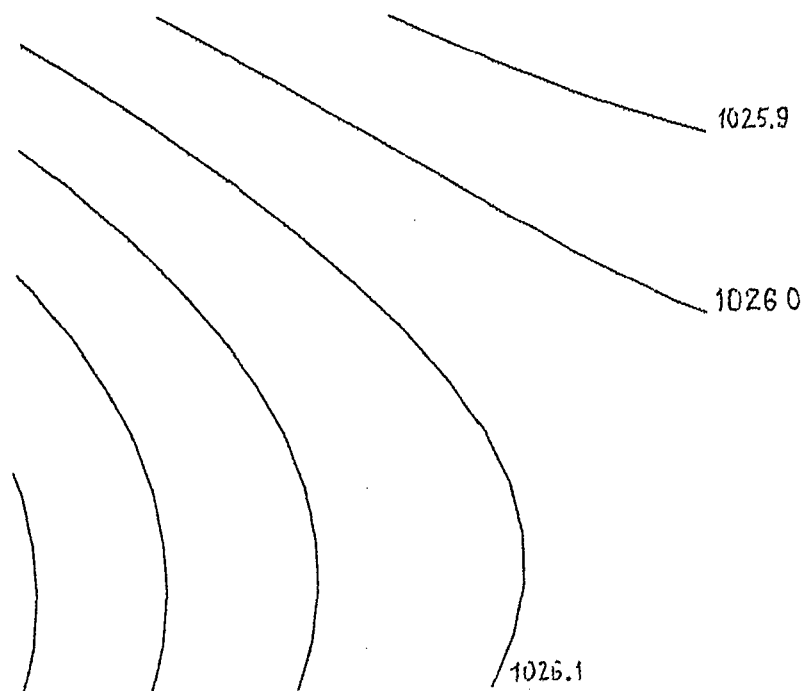


Abb. 14      Ausschnittvergrößerung aus Abb. 13, die dem Maßstab  
der anderen Abbildungen entspricht

Das Temperaturfeld wird in der Realität so aussehen, daß über dem Wasser einheitlich eine relativ niedrige Temperatur herrscht. An den Küsten wird ein scharfer Temperaturgegensatz herrschen und auf dem Land werden die Temperaturen sehr unterschiedlich, aber alle höher als über der Kieler Bucht sein. Die Funktion wird also bestrebt sein, eine Schüssel darzustellen, mit steilen Rändern an der Küste, die zum Land wieder abflachen. Das Abflachen kann allerdings nur erkannt werden, wenn hinter der Küste noch weitere Stationen vorhanden sein. Sonst wird der Trend fortgesetzt. Dieser Effekt ist in der Nordostecke des Gebietes zu den Terminen 9 12 und 15 Uhr (Abb. 18-20) zu bemerken. Er tritt aber auch hier nur auf, weil die Station Taars gerade zu diesem Tag einen längeren Datenausfall verzeichnet und so nicht in die Analyse eingeht. Dadurch wird das stationsleere Gebiet im Nordosten so groß, daß auch die Hilfsstation außerhalb des Gebietes den Effekt nur abmildern aber nicht ganz verhindern kann. Durch den Anstieg der Funktion in der Region um Lolland und die erst außerhalb des Gebietes durch die Hilfsstation erzwungene Angleichung an den Wert für Landstationen, kann in der Nordostecke dieses in der Realität nicht vorhandene Maximum entstehen. Es erklärt sich einfach aus dem Unvermögen einer kontinuierlichen Funktion einem Knick zu folgen, der von einer ungenügenden Anzahl Stationen gemessen wird. Aber auch in den vorliegenden Fällen sind diese Abweichungen noch tragbar, da sie immer noch klein gegen die tatsächlichen Temperaturgradienten sind. Zum Mittagstermin hat sich die Erwärmung weiter fortgesetzt. Den  $23^{\circ}\text{C}$  über der Kieler Bucht stehen 25 bis  $32^{\circ}\text{C}$  über Land entgegen. Die Isothermen in Küstennähe nehmen eine typische Form an, die immer bei starken Land-See-Gegensätzen auftritt.

Um 15 Uhr ist über dem Wasser schon wieder eine schwache Abkühlung zu bemerken. Es werden nur noch  $22^{\circ}\text{C}$  angezeigt. Über Land jedoch haben die Temperaturen erst jetzt ihren Höchstwert erreicht. An diesem Termin sind die

Gegensätze also am größten. Die niedrigste Temperatur mißt Kiel Leuchtturm mit  $21^{\circ}\text{C}$ , während Hohn  $34^{\circ}\text{C}$  meldet.

Schon zwei Stunden vor Sonnenuntergang zeigt das Temperaturfeld von 18 Uhr (Abb. 21), daß die Abkühlung schon eingesetzt hat. Das beherrschende Minimum über der Wasserfläche ist verschwunden und das ganze Bild scheint drastisch verändert. Hierzu werden allerdings auch Advektionsvorgänge beigetragen haben. Die kältere Luft liegt zu diesem Termin weiter nördlich, während im Südosten sogar höhere Temperaturen als zum Vorterrain vorhanden sind. Nachts um 21 Uhr schließlich sind die Temperaturgegensätze völlig ausgeglichen. Fast über das ganze Gebiet hinweg wird eine Temperatur von  $21^{\circ}\text{C}$  gezeigt.

Diese Serie zeigt anschaulich das Auflösungsvermögen der Funktion. Besonders die Mittag- und Nachmittagstermine zeigen den Versuch der Funktion, die komplexe Land-Seeverteilung zu erfassen. Dies gelingt erstaunlich gut, wenn man bedenkt, wie unregelmäßig die Stationsverteilung ist und wie groß die Streuung. Die mittlere quadratische Abweichung  $\sigma$  schwankte zwischen  $0,2^{\circ}\text{C}$  nachts und  $1,2^{\circ}\text{C}$  tagsüber.

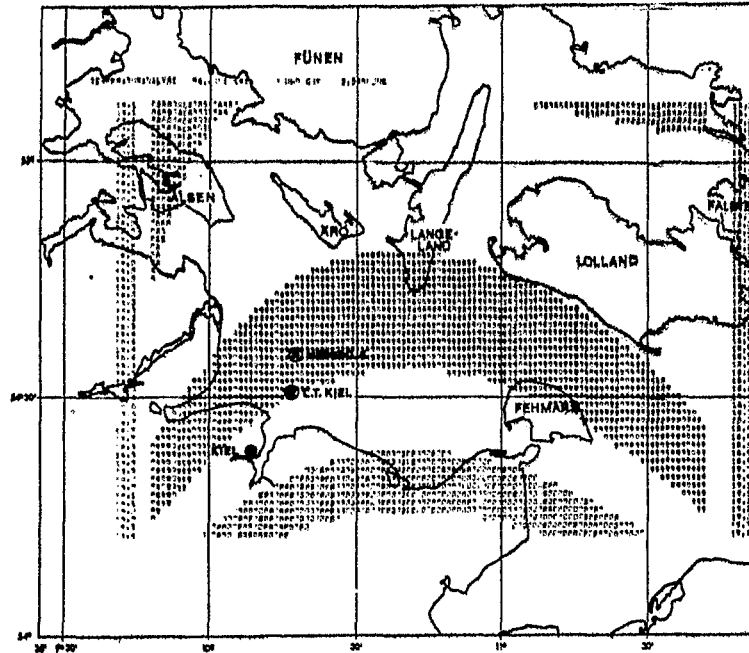


Abb. 15 Temperatur 26. Juni 1976 0 Uhr GMT  
Stationen: 14 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma: 0.2^{\circ}\text{C}$

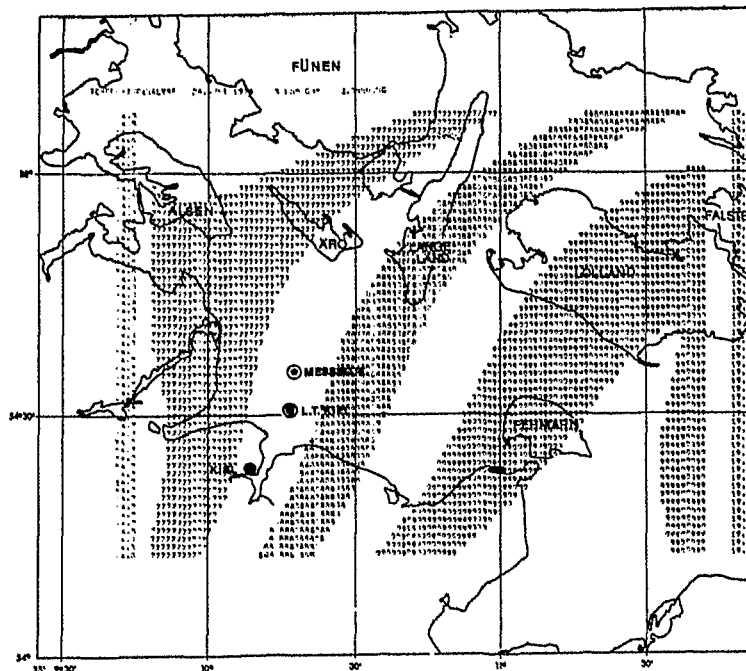


Abb. 16 Temperatur 26. Juni 1976 3 Uhr GMT  
Stationen: 14 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma: 0.6^{\circ}\text{C}$

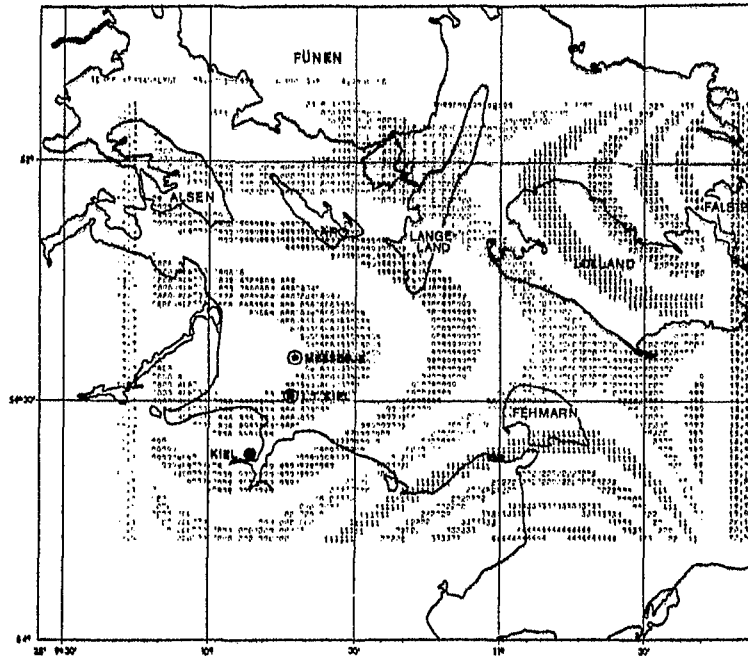


Abb. 17 Temperatur 26. Juni 1976 6 Uhr GMT  
Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 18 Ordnung: 4  $\sigma: 0.6^{\circ}\text{C}$

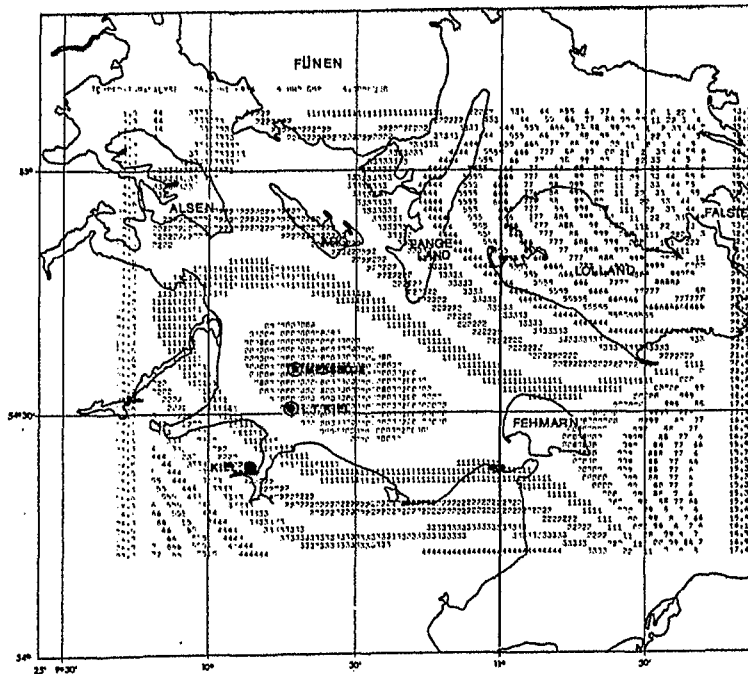


Abb. 18 Temperatur 26. Juni 1976 9 Uhr GMT  
Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 18 Ordnung: 4  $\sigma: 1.1^{\circ}\text{C}$

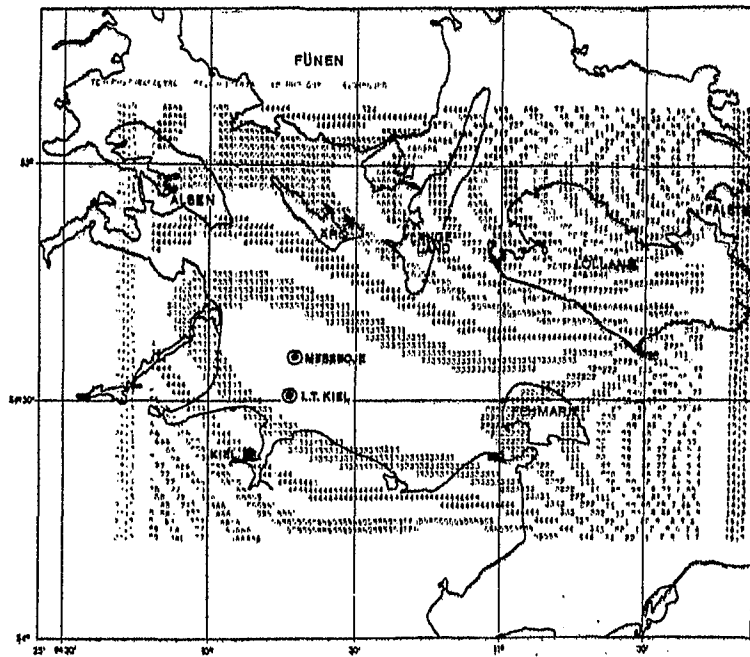


Abb. 19 Temperatur 26. Juni 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 18 Ordnung: 4  $\sigma: 1.2^{\circ}\text{C}$

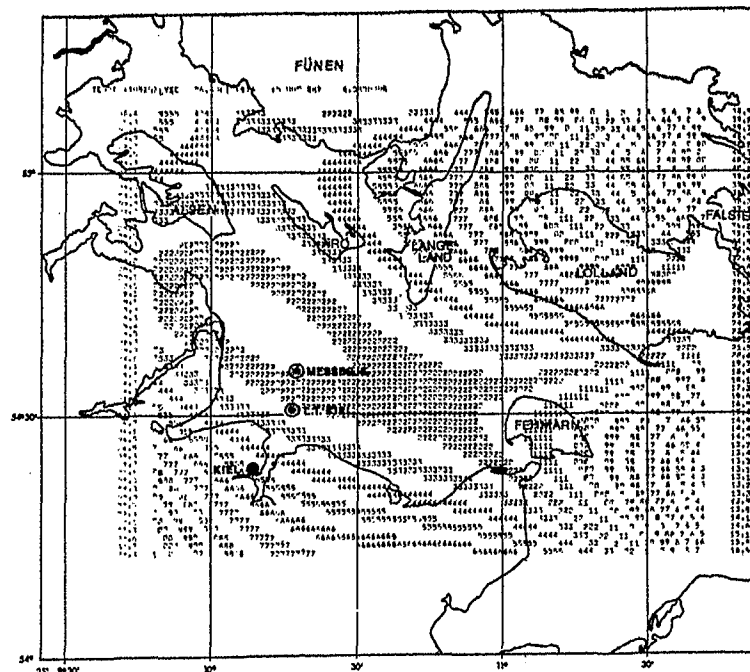


Abb. 20 Temperatur 26. Juni 1976 15 Uhr GMT  
Stationen: 17 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 15 Ordnung: 4  $\sigma: 0.7^{\circ}\text{C}$



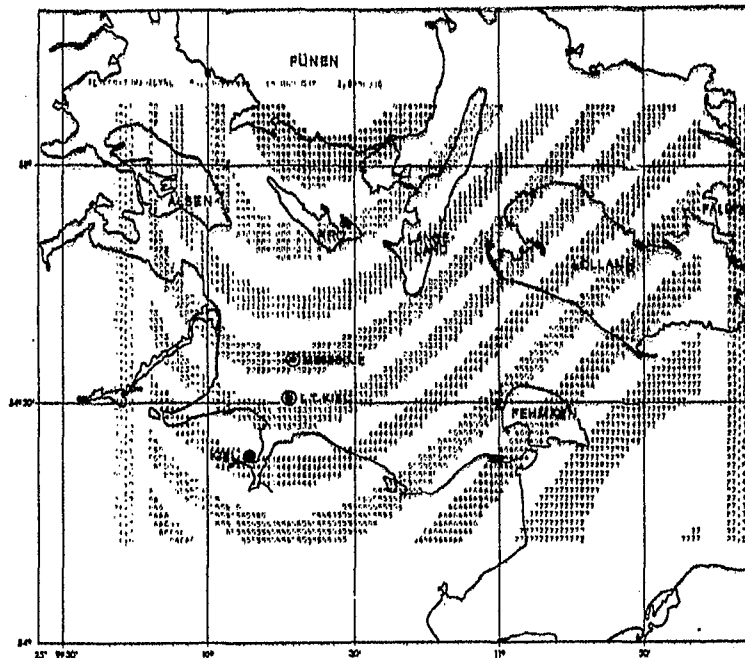


Abb. 21 Temperatur 26. Juni 1976 18 Uhr GMT  
Stationen: 16 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 14 Ordnung: 3  $\sigma: 0,9^{\circ}\text{C}$

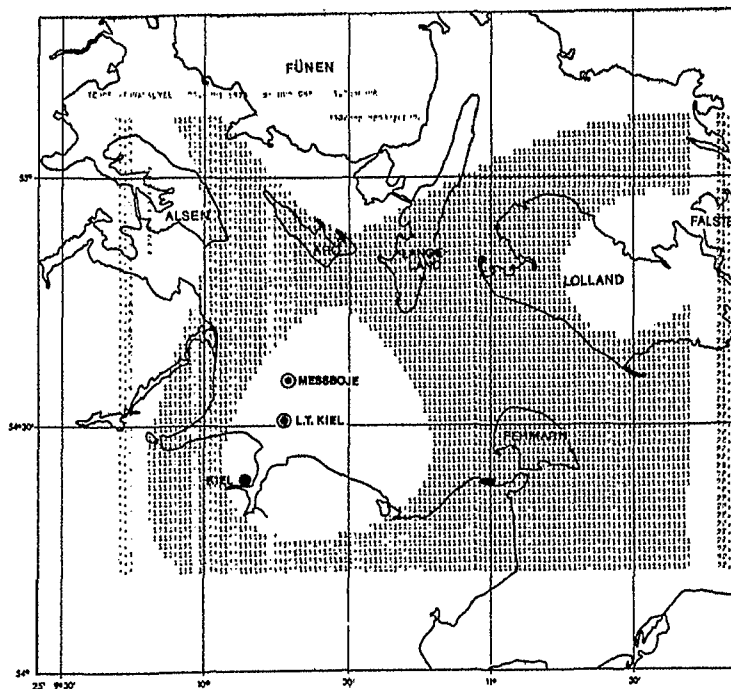


Abb. 22 Temperatur 26. Juni 1976 21 Uhr GMT  
Stationen: 19 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 15 Ordnung: 3  $\sigma: 0,7^{\circ}\text{C}$

### 7.3.3. Feuchte

Die Serie der Feuchteanalysen wird in den Abb. 23 - 30 gezeigt. Der Tagesgang in der über das Gebiet gemittelten Feuchte ist deutlich zu erkennen. Von 12 g/kg um 0 Uhr (Abb. 23) steigt  $q$  auf 15 g/kg um 18 Uhr (Abb. 29) an, um dann bis 21 Uhr (Abb. 30) wieder auf 13 g/kg abzusinken. Zeigen die Isoplethen der Feuchte um 0 und 3 Uhr (Abb. 23 und 24) noch einen diagonalen Verlauf, so stellt sich ab 6 Uhr (Abb. 25) ein relativ konstantes Bild ein. Einer hohen Feuchte im Osten steht geringe Feuchte im Westen gegenüber. Während der Erwärmungsphase des Tages ist eine Verstärkung des Feuchtegradienten zu erkennen, in der Abkühlungsphase erfolgt dann wieder Abschwächung. Zu allen Terminen zeigt das Feuchtefeld jedoch eine relativ einfache Struktur, obwohl die benutzte Ordnung 3 ein wesentlich komplizierteres Feld darzustellen vermag. Das spricht dafür, daß das Feuchtefeld keine großen Veränderungen aufweist. In Hinsicht auf die Feuchte wäre sicherlich eine Analyse von durchziehenden Niederschlagsfeldern von Interesse.

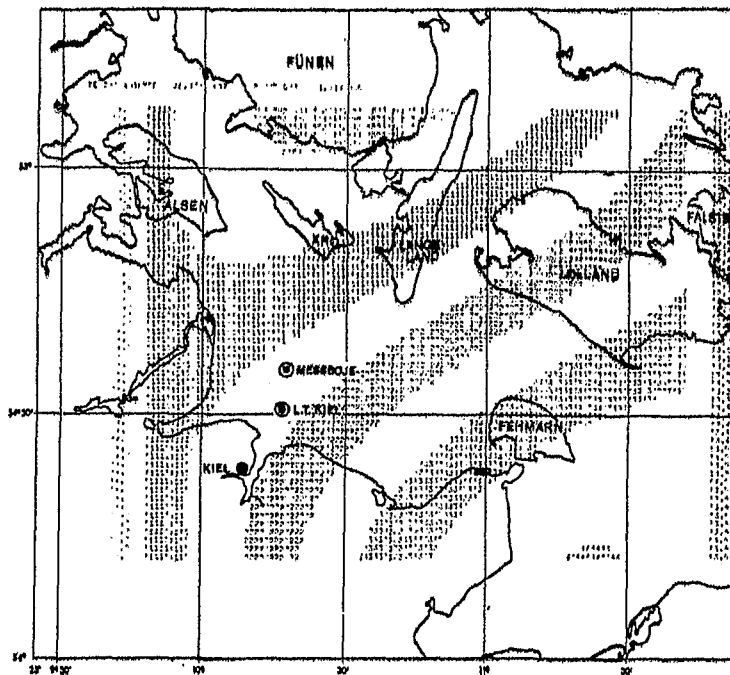


Abb. 23 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 0 Uhr GMT  
Stationen: 13 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 10 Ordnung: 3  $\sigma$ : 0.5 g/kg

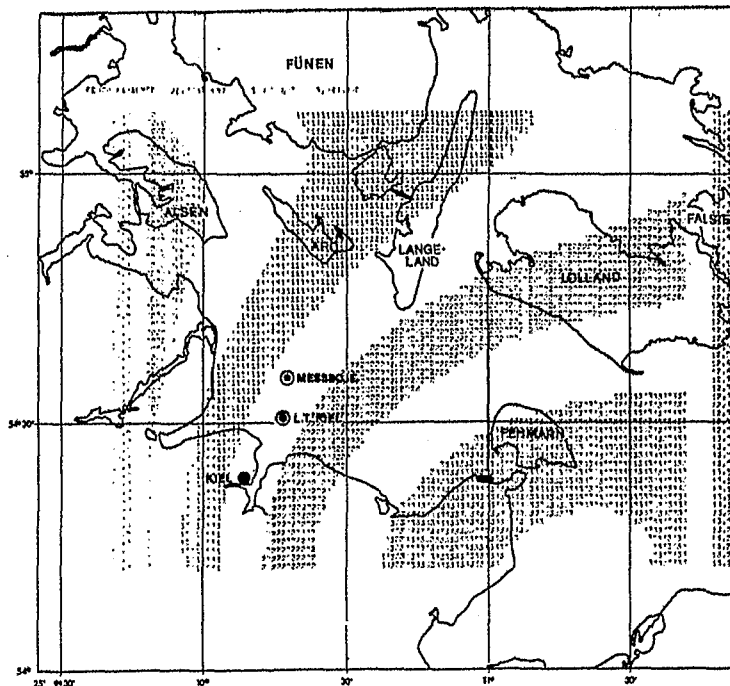


Abb. 24 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 3 Uhr GMT  
Stationen: 13 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 10 Ordnung: 3  $\sigma$ : 0.6 g/kg

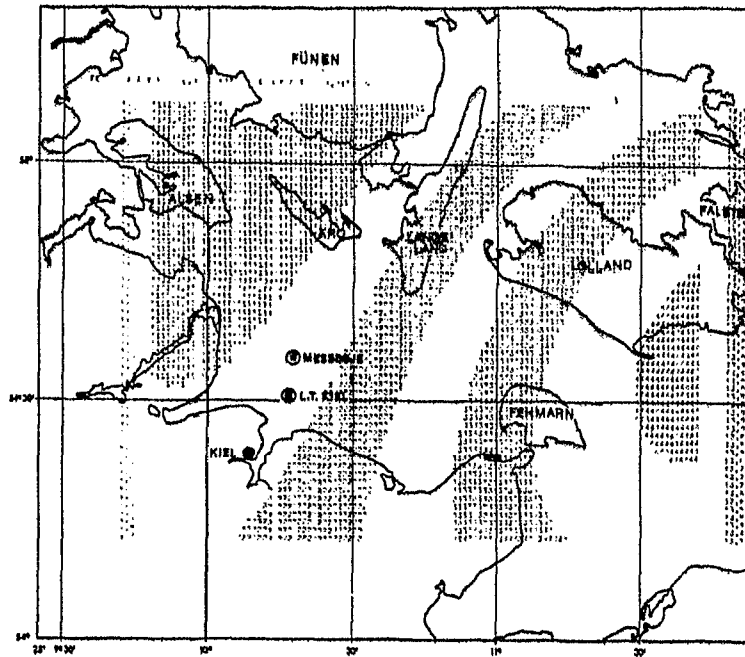


Abb. 25 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 6 Uhr GMT  
Stationen: 22 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 16 Ordnung: 3  $\sigma$ : 0,6 g/kg

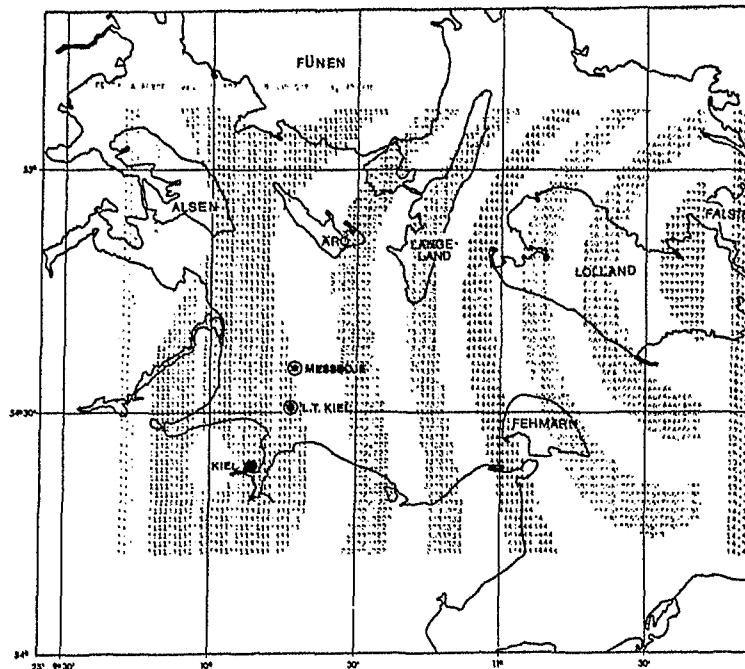


Abb. 26 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 9 Uhr GMT  
Stationen: 22 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 16 Ordnung: 3  $\sigma$ : 1,3 g/kg

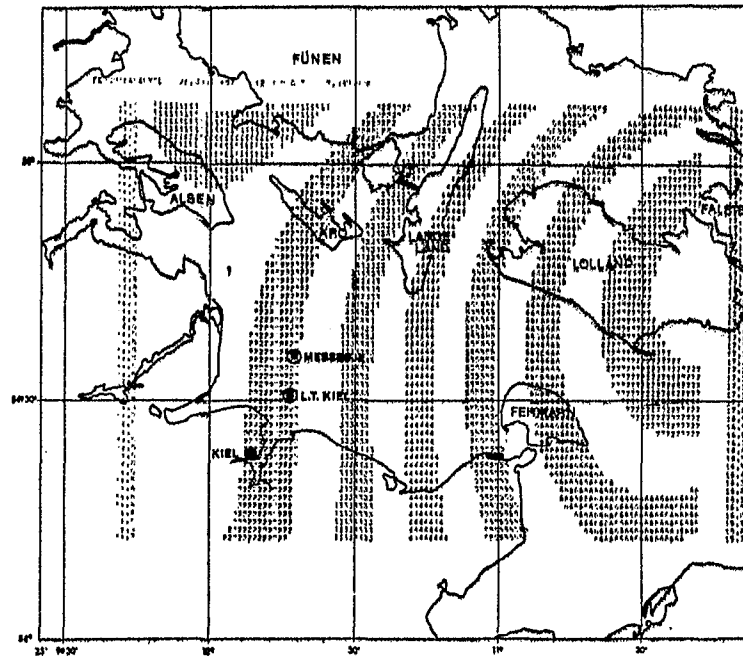


Abb. 27 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 12 Uhr GMT  
Stationen: 22 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 16 Ordnung: 3  $\sigma$ : 1.3 g/kg

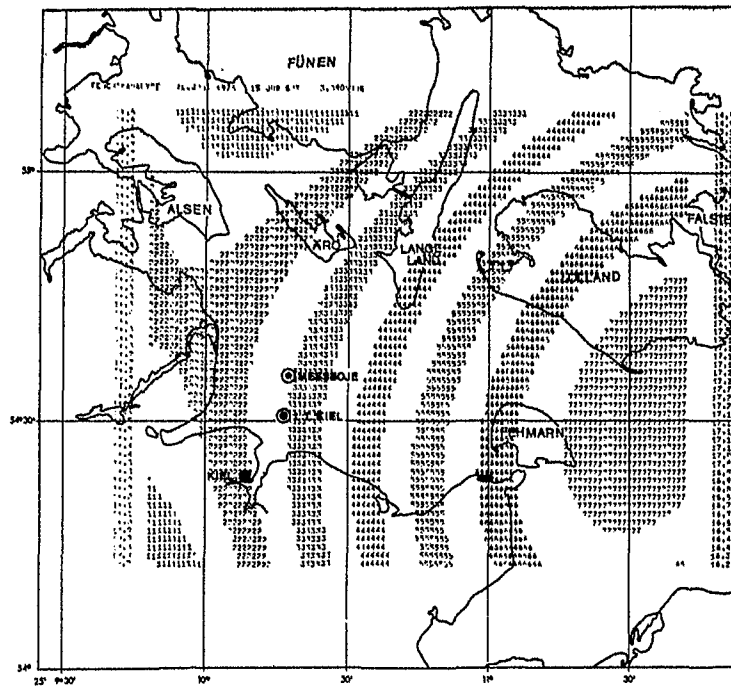


Abb. 28 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 15 Uhr GMT  
Stationen: 16 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma$ : 1.1 g/kg

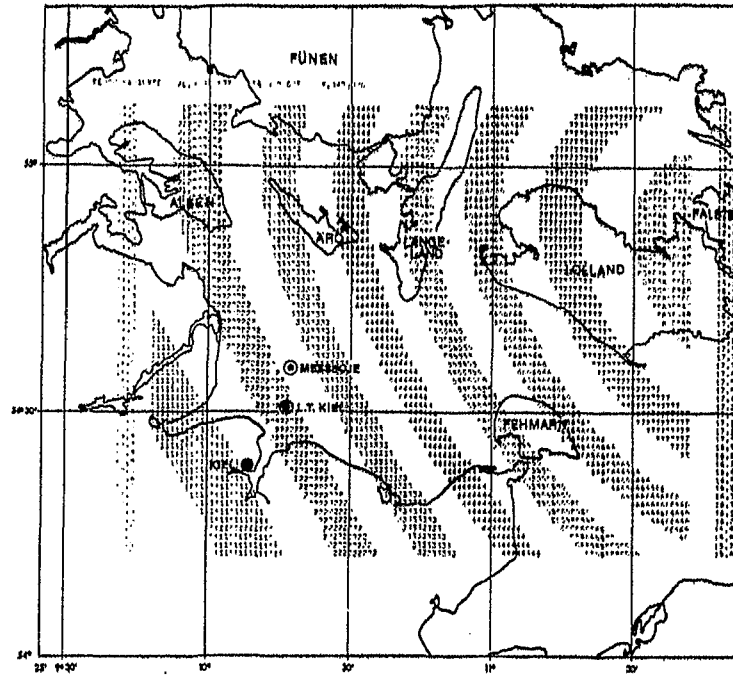


Abb. 29 Spezifische Feuchte 26. Juni 1976 18 Uhr GMT  
Stationen: 15 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma$ : 1.2 g/kg

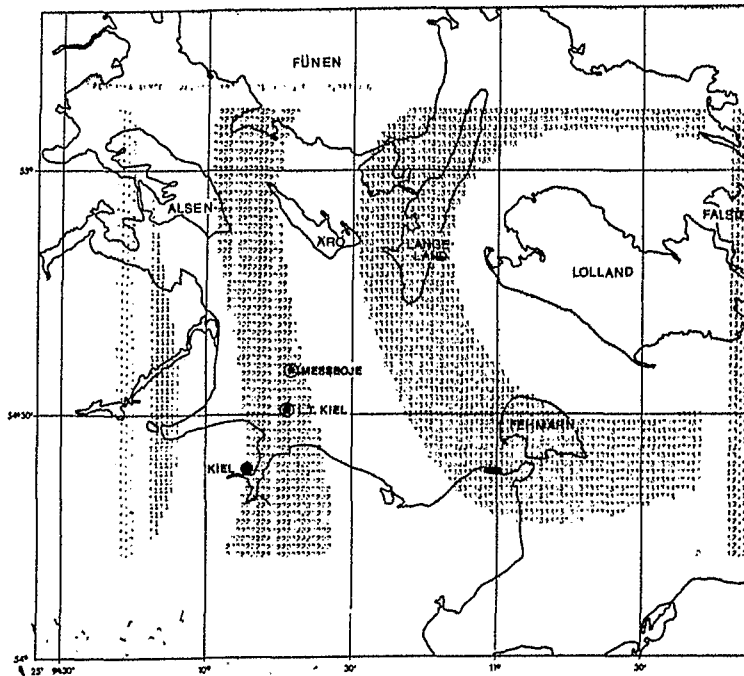


Abb. 30 Spezifische Feuchte 26 Juni 1976 21 Uhr GMT  
Stationen: 18 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma$ : 0,7 g/kg

#### 7.3.4. Wind

Nach der synoptischen Wetterkarte (Abb. 12) konnten für den analysierten Tag Windfelder mit starker Veränderlichkeit erwartet werden. Die Abb. 31 - 38, in denen die Windfelder der 8 Termine gezeigt werden, entsprechen diesen Erwartungen. Abb. 31 zeigt das Feld um 0 Uhr GMT. Eine über der Kieler Bucht nordwestliche Strömung geht zum Osten hin in eine schwache Nordströmung über. Im Nordosten liegt die Windstärke unter 1 Kt. Das Feld um 3 Uhr (Abb. 32) zeigt gegenüber dem Vortermine schon wesentliche Veränderungen. Über dem ganzen Gebiet weist das Feld eine zyklonale Krümmung auf. Von einer Nordwestrichtung an der Schleswig-Holsteinischen Küste dreht der Wind über West im Zentrum der Kieler Bucht auf Süd am Ostrand des Gebietes. Die Windstärke liegt bei 4 - 5 Kt. Der nächste Termin um 6 Uhr (Abb. 33) bringt nur geringe Veränderungen. Die Krümmung ist etwas geringer, die Windstärke beträgt etwa 3 Kt. Die Tendenz, die zwischen 3 und 6 Uhr erkennbar ist, wird bis 9 Uhr (Abb. 34) fortgesetzt. Das beherrschende Flautengebiet in der Mitte zeigt die Abnahme der Windstärke auf Werte unter 1 Kt an. Da fast über dem gesamten Gebiet Windstille herrscht, wird der in den Temperaturanalysen ausgewiesene scharfe Temperaturgradient möglich, da keine Advektion die Unterschiede ausgleicht.

Auch das 12 Uhr Feld (Abb. 35) wird noch von einem großen Flautengebiet beherrscht. Es machen sich jedoch erste Anzeichen einer Divergenz am Boden bemerkbar. Sowohl im Osten als auch im Nordwesten zeigen die Windvektoren aus dem Flautengebiet hinaus, was auf Absinkbewegungen in diesem Gebiet schließen läßt. Verstärkt zeigt sich dieser Effekt in Abb. 36, dem 15 Uhr Termin. Aus diesem Gebiet am Südrand weht

der Wind nach allen Himmelsrichtungen hinaus. Die Vektoren zeigen außerdem, daß das Ausströmen antizyklonal erfolgt. Da alle Voraussetzungen für die Entstehung einer Land-See-Zirkulation an diesem Tag gegeben waren, ist zu vermuten, daß eben zu diesem Termin der Seewind einsetzt. Die Temperaturgegensätze waren jedenfalls, wie zuvor gezeigt, stark ausgeprägt. Allerdings liegt das Divergenzgebiet nicht direkt über der Kieler Bucht, sondern ist etwas nach Südosten verschoben. Daß dieses Feld jedoch nicht zufällig diese Form hat, zeigt die nächste Abbildung. Um 18 Uhr (Abb. 37) ist wiederum deutlich ein Divergenzgebiet zu lokalisieren. Erst um 21 Uhr (Abb. 38) erfolgt eine Umstellung. Das Feld zeigt zu diesem Zeitpunkt schwache Winde aus Süd bis West. Diese Anzeichen von Seewind, bei Tagen mit starker Sonneneinstrahlung, waren auch noch in einigen anderen Feldern, die hier nicht gezeigt werden, zu erkennen. Eine spezielle Untersuchung dieser kleinskaligen Vorgänge mit dem vorgestellten Verfahren könnte das Thema späterer Untersuchungen sein.



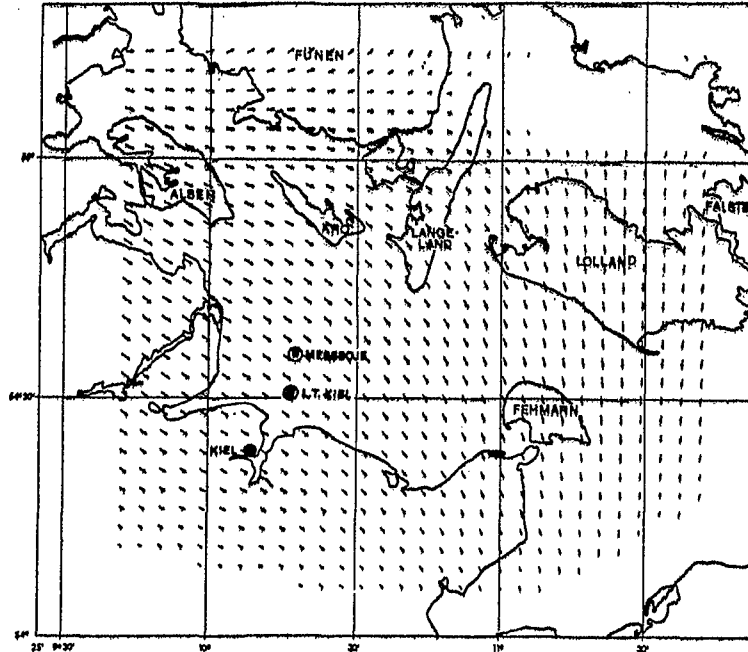


Abb. 31 Wind 26. Juni 1976 0 Uhr GMT  
Stationen: 14 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.4 Kt  $\sigma_v$ : 1.6 Kt

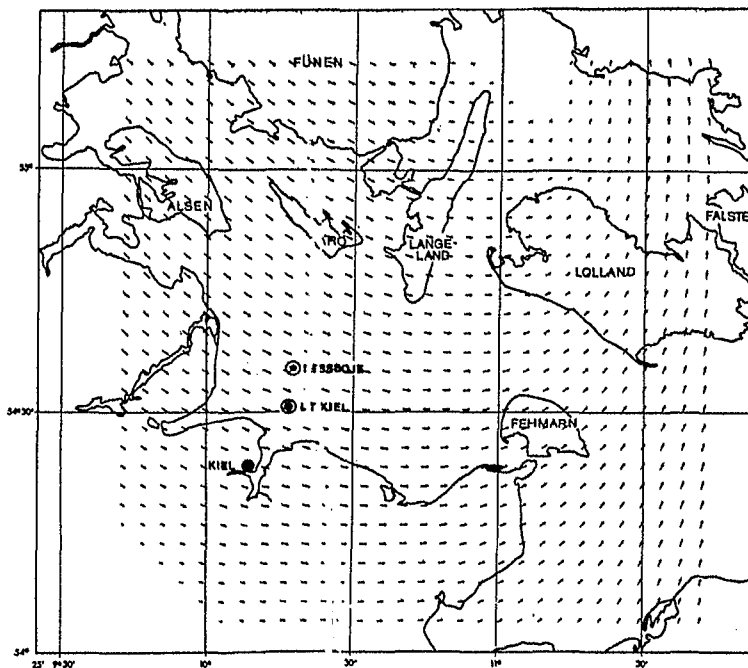


Abb. 32 Wind 26. Juni 1976 3 Uhr GMT  
Stationen: 14 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 12 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.1 Kt  $\sigma_v$ : 0.9 Kt

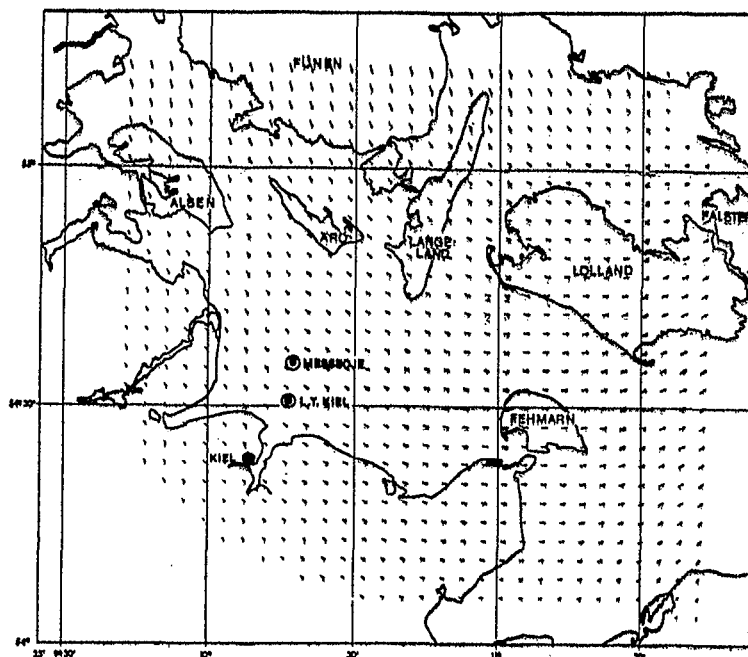


Abb. 33 Wind 26. Juni 1976 6 Uhr GMT  
 Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 18 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.1 Kt  $\sigma_v$ : 1.4 Kt

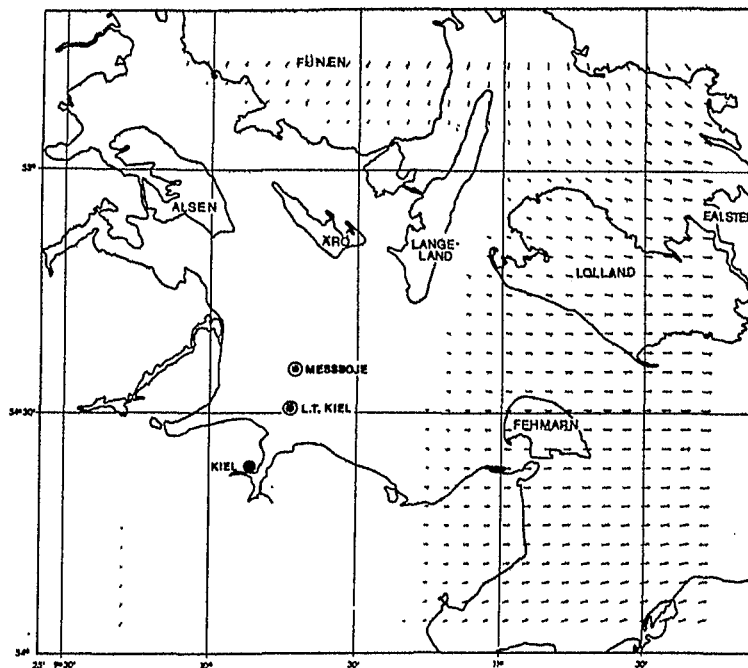


Abb. 34 Wind 26. Juni 1976 9 Uhr GMT  
 Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 18 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.4 Kt  $\sigma_v$ : 2.0 Kt

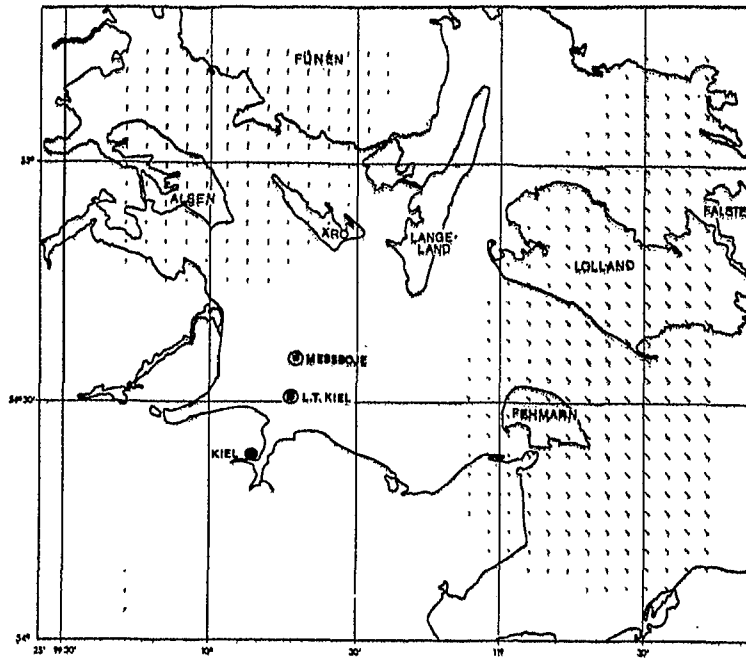


Abb. 35 Wind 26. Juni 1976 12 Uhr GMT  
 Stationen: 23 Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 18 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 2.6 Kt  $\sigma_v$ : 2.6 Kt

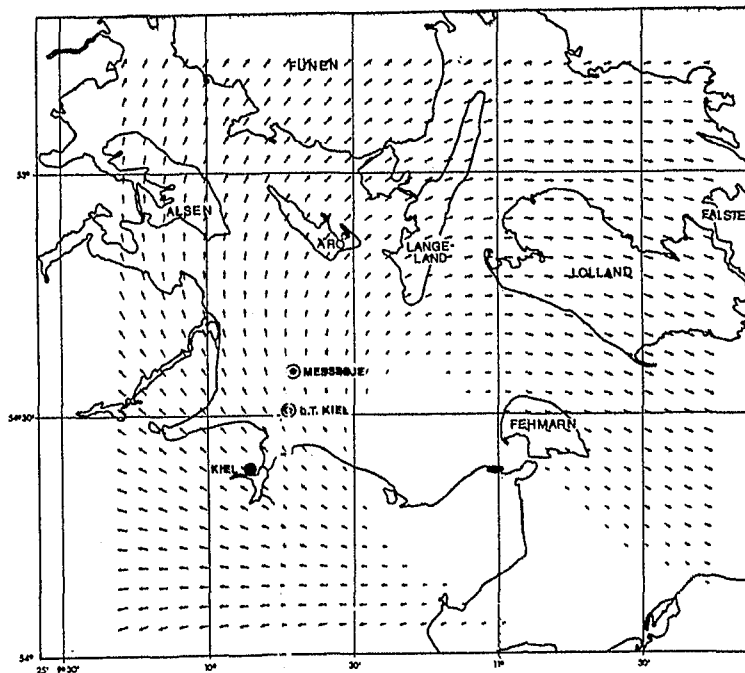


Abb. 36 Wind 26. Juni 1976 15 Uhr GMT  
 Stationen: 17 Hilfsstationen: 4  
 ESZ: 15 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 2.5 Kt  $\sigma_v$ : 1.5 Kt

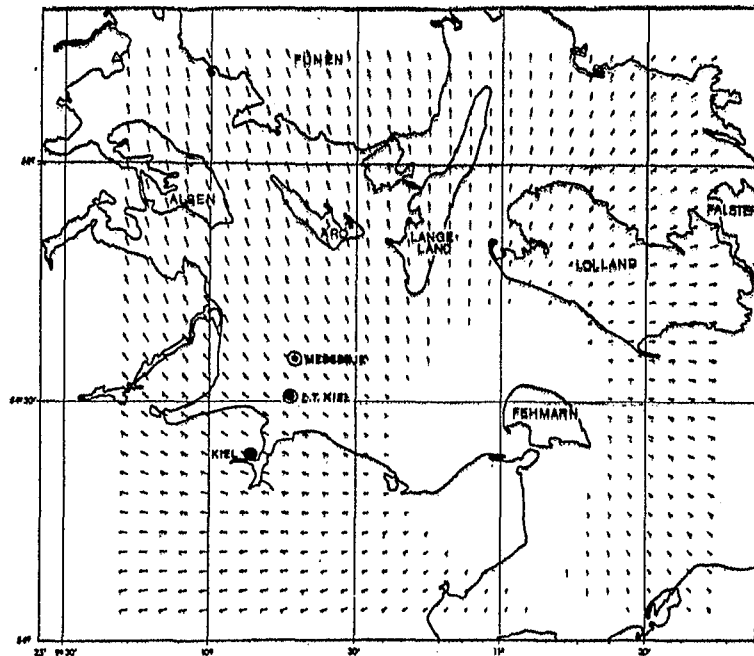


Abb. 37 Wind 26. Juni 1976 18 Uhr GMT  
Stationen: 16 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 14 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.2 Kt  $\sigma_v$ : 1.4 Kt

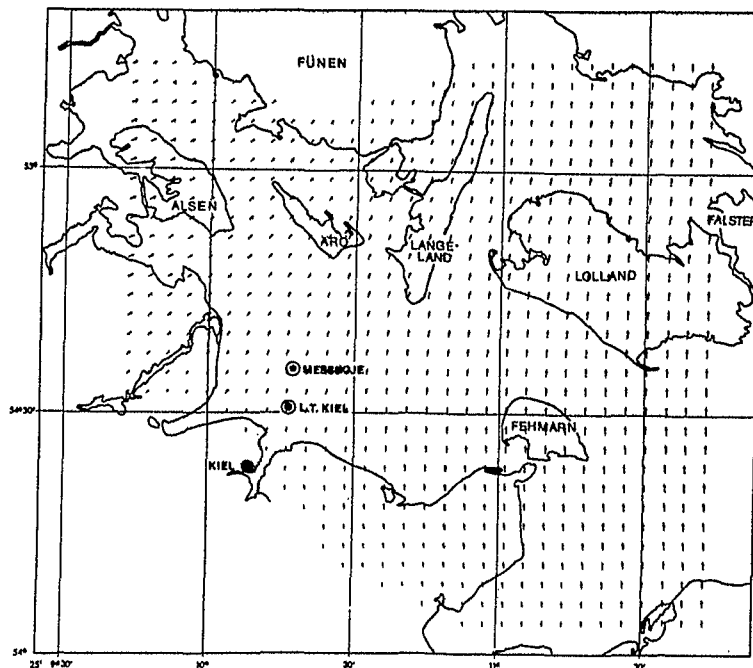


Abb. 38 Wind 26. Juni 1976 21 Uhr GMT  
Stationen: 19 Hilfsstationen: 4  
ESZ: 15 Ordnung: 3  $\sigma_u$ : 1.3 Kt  $\sigma_v$ : 1.4 Kt

## 8. WEITERE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Die Funktionskoeffizienten wurden bestimmt, um für beliebige Gitter Funktionswerte an den Gitterpunkten berechnen zu können. Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten der Koeffizienten noch nicht erschöpft. Sie bilden zusammen mit den Legendre'schen Polynomen Funktionen, deren Ableitungen sich analytisch bilden lassen. Durch einfache arithmetische Operationen mit den Koeffizienten erhält man die partiellen Ableitungen der Funktion nach  $x$  und  $y$ . Die Ableitung bildet dann wieder eine Funktion der gleichen Gestalt, mit einer um 1 verminderten Ordnung. Entscheidend ist, daß zur Bildung der Ableitung nur die Koeffizienten benötigt werden, auf diese Weise lassen sich leicht Gradientenfelder einer skalaren Größe oder Divergenz- und Rotationsfelder einer vektoriellen Größe berechnen. Als Beispiel für diese Anwendung zeigt die Abb. 39 das Divergenzfeld zur Windanalyse in Abb. 37. In Abb. 40 ist das entsprechende Rotationsfeld dargestellt. Deutlich sind die Zentren positiver Divergenz und negativer Rotation über der Kieler Bucht zu erkennen.

Die nächste Anwendungsmöglichkeit liegt in der Klassifikation von Wetterlagen mit Hilfe der Koeffizienten. So gibt z.B. der 1. Koeffizient den Mittelwert der analysierten Größe über dem Gebiet an, andere Koeffizienten ermöglichen Angaben über den mittleren Gradienten. Durch Vergleich von Koeffizienten, d.h. Quotientenbildung, können Angaben über Veränderlichkeit oder Konstanz der Größe über dem Gebiet gemacht werden. Typische Wetterlagen können somit schon aus den Koeffizienten erkannt werden. Dies bietet die Möglichkeit aus einer Vielzahl analysierter Termine, spezielle Wetterlagen durch ein einfaches Programm herauszusuchen. Als Kriterien für das Suchprogramm gelten dann z.B. Vorzeichen und Größe bestimmter Koeffizienten,

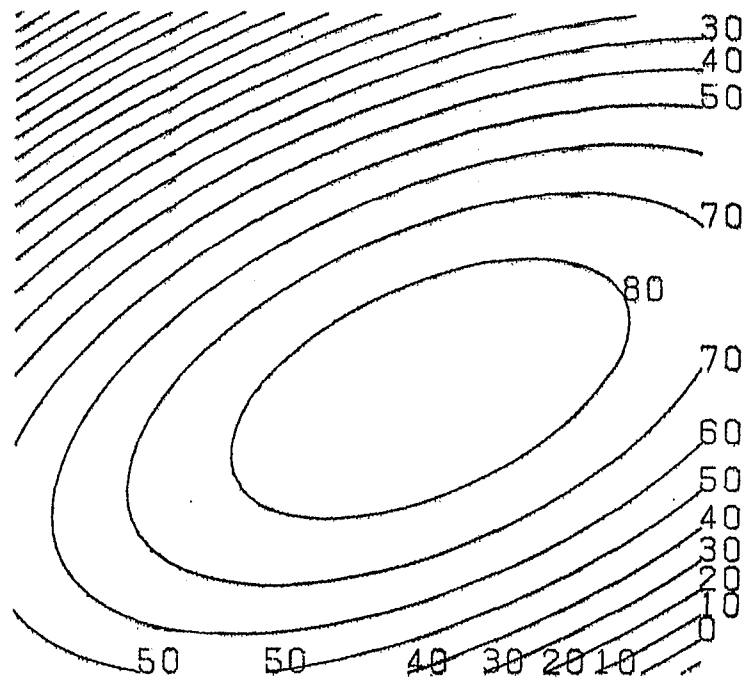


Abb. 39 Divergenz des Windfeldes aus Abb. 37  
Einheit:  $10^{-6} \text{sec}^{-1}$

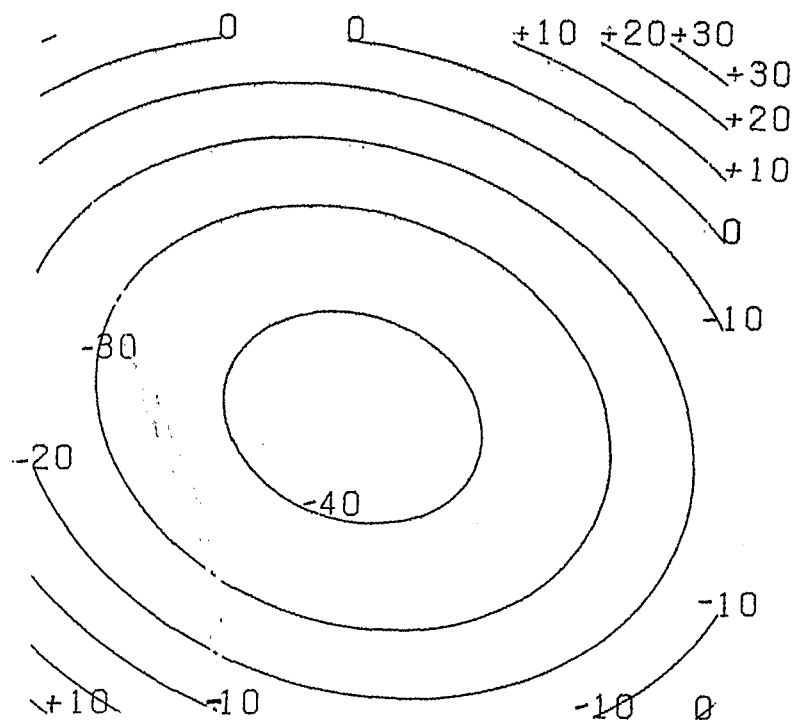


Abb. 40 Rotation des Windfeldes aus Abb. 37  
Einheit:  $10^{-6} \text{sec}^{-1}$

Quotienten aus anderen oder noch kompliziertere Ausdrücke. Das vorhandene Material reicht aus, um solche Kriterien empirisch zu bestimmen.

## 9. BEURTEILUNG DES VERFAHRENS

Die artspezifischen Effekte wurden in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich diskutiert. An dieser Stelle sollen lediglich die Vor- und Nachteile des Verfahrens, die unabhängig von Gebiet, Stationszahl und Art der Meßgröße sind, erläutert werden. Zu diesem Zweck soll das Verfahren mit der häufig benutzten Interpolation auf ein Gitter verglichen werden. Die Vorteile liegen im wesentlichen auf dem Gebiet der maschinellen Datenverarbeitung. Pro Analyse werden (bei einer maximalen Ordnung von 4) bis zu 15 Koeffizienten berechnet. Das Ergebnis liegt also in Form von 15 Zahlen vor, die alle Informationen beinhalten. Das Ergebnis einer Windanalyse stellt sich also in 30 Zahlen dar, während ein in der Gitterinterpolation hergestelltes Windfeld, z.B. in der Größe 30 x 30 wie in den Abbildungen, 1800 Zahlen enthält, die alle gespeichert werden müßten. Man kann also im Platzbedarf der Ergebnisse von einem Verhältnis von ungefähr 1:60 ausgehen. Bei der Speicherung der Analyseergebnisse auf Magnetband bedeutet dies, daß mit dem vorgestellten Verfahren sämtliche Analysen aus 2 Jahren auf einem Magnetband Platz finden.

Die Bildung von partiellen Ableitungen wurde schon im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Sollen Ableitungen eines Feldes gebildet werden, das nur als Gitter vorliegt, bedeutet dies, daß im Kernspeicher des Computers drei Felder der benutzten Gittergröße gleichzeitig Platz beanspruchen. Nämlich das Funktionsfeld, sowie die Felder der Differenzenquotienten von  $x$  und  $y$ . Im vorgestellten Verfahren werden wieder nur die Koeffizienten benötigt.

Der dritte Vorteil schließlich liegt in der Anpassungsfähigkeit für die weitere Nutzung der Ergebnisse. Die Koeffizienten sind so weggespeichert, daß sie in verschiedenen Programmiersprachen sofort gelesen werden können, was keine Selbstverständlichkeit ist. Benötigt der Benutzer ein Gitter, so kann er es mit einer einfachen Prozedur oder Subroutine selbst erstellen. Für *Algol* und *Fortran* liegen diese Programmteile fertig vor.

Im folgenden werden die Nachteile gegenüber der Gitterinterpolation erläutert.

Es werden relativ viele Stationen benötigt, um eine gute Auflösung zu erhalten. Große stationsleere Gebiete, in denen die analysierte Größe große Veränderungen erfährt, können zu Instabilitäten führen. Durch die glättende Wirkung der Funktion können scharfe Gradienten nicht so gut erfaßt werden, wie es die Interpolation tun würde. Die Probleme in den Abb. 18 bis 20 wären sicher für die Interpolation geringer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das vorgestellte Analyseverfahren mit Legendre'schen Polynomen und der Methode der kleinsten Quadrate immer dann angewandt werden sollte, wenn mehr als 12 Stationen zur Verfügung stehen. Die Verteilung der Stationen sollte so aussehen, daß zumindest in den Randgebieten des Rechtecks Stationen vorhanden sind. Ein stationsleeres Gebiet in der Mitte des Analyserechtecks führt nicht zu Instabilitäten.

Bei weiterer Verwendung der Analyseergebnisse in numerischen Modellen empfiehlt sich das Verfahren wegen der großen Vorteile in der Datenverarbeitung auf jeden Fall.



## 8. WEITERE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Die Funktionskoeffizienten wurden bestimmt, um für beliebige Gitter Funktionswerte an den Gitterpunkten berechnen zu können. Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten der Koeffizienten noch nicht erschöpft. Sie bilden zusammen mit den Legendre'schen Polynomen Funktionen, deren Ableitungen sich analytisch bilden lassen. Durch einfache arithmetische Operationen mit den Koeffizienten erhält man die partiellen Ableitungen der Funktion nach  $x$  und  $y$ . Die Ableitung bildet dann wieder eine Funktion der gleichen Gestalt, mit einer um 1 verminderten Ordnung. Entscheidend ist, daß zur Bildung der Ableitung nur die Koeffizienten benötigt werden, auf diese Weise lassen sich leicht Gradientenfelder einer skalaren Größe oder Divergenz- und Rotationsfelder einer vektoriellen Größe berechnen. Als Beispiel für diese Anwendung zeigt die Abb. 39 das Divergenzfeld zur Windanalyse in Abb. 37. In Abb. 40 ist das entsprechende Rotationsfeld dargestellt. Deutlich sind die Zentren positiver Divergenz und negativer Rotation über der Kieler Bucht zu erkennen.

Die nächste Anwendungsmöglichkeit liegt in der Klassifikation von Wetterlagen mit Hilfe der Koeffizienten. So gibt z.B. der 1. Koeffizient den Mittelwert der analysierten Größe über dem Gebiet an, andere Koeffizienten ermöglichen Angaben über den mittleren Gradienten. Durch Vergleich von Koeffizienten, d.h. Quotientenbildung, können Angaben über Veränderlichkeit oder Konstanz der Größe über dem Gebiet gemacht werden. Typische Wetterlagen können somit schon aus den Koeffizienten erkannt werden. Dies bietet die Möglichkeit aus einer Vielzahl analysierter Termine, spezielle Wetterlagen durch ein einfaches Programm herauszusuchen. Als Kriterien für das Suchprogramm gelten dann z.B. Vorzeichen und Größe bestimmter Koeffizienten,

## VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

		Seite
1	Stationskarte	2
2	Karte mit Gebiet und Polygonen	8
3	Instabile Analyse	25
4	Instabile Analyse bei verminderter Ordnung	25
5	Stabilisierte Analyse mit Hilfs- stationen	26
6	Kleinräumige Druckanalyse	30
7	Temperaturanalyse	31
8	Feuchteanalyse	32
9 - 11	Windanalysen	39 - 41
12	Synop-Karte 26. Juni 1976	43
13 - 14	Druckanalysen 26. Juni 1976	45
15 - 22	Temperaturanalysen 26. Juni 1976	48 - 51
23 - 30	Feuchteanalysen 26. Juni 1976	53 - 56
31 - 38	Windanalysen 26. Juni 1976	59 - 62
39	Divergenzfeld	64
40	Rotationsfeld	64

## VERZEICHNIS DER TABELLEN UND DIAGRAMME

	Seite
1 Stationen mit Höhe und Koordinaten	12
2 Stationen mit Klassifizierung und Beobachtungsterminen	13
3 Datenaufbereitung	17
4 Datenübersicht	18
5 Blockdiagramm des Analyseprogramms	19
6 Originaldaten LT-Kiel, Holtenau, Schleswig, Jagel	33
7 Beispiel der Analysestatistik	24

## LITERATURVERZEICHNIS

- Clauss, E., G. Heßler, P. Speth, K. Uhlig, 1977:  
Datendokumentation zum meteorologischen  
Meßprojekt "KIHLER BUCHT '76",  
noch unveröffentlicht, Reihe IfM, Abt. Meteorologie
- Fechner, H., 1977: Darstellung von meteorologischen Größen, die  
ein endliches Definitionsgebiet haben, durch  
Reihen orthogonaler Funktionen,  
noch unveröffentlicht, Reihe IfM, Abt. Meteorologie
- Speth, P., H. Skade, 1977: An investigation of the atmospheric  
heat and moisture balance in the Baltic Sea  
region, part 1,  
Meteorol. Rdsch. 30, 71-91
- Stoer, J., 1970: Einführung in die numerische Mathematik,  
Springer Verlag

## ANHANG

Auf Magnetband bereitgestellte Daten

Magnetband: PDP-10 7-Spur

Schreibdicke: 800 BPI

Die Ergebnisse einer Analyse sind auf jeweils einer Zeile im Datenfile gespeichert.

1. Zahl: Termin 10-stellig

Ziffer 1- 4: Jahr

Ziffer 5- 6: Monat

Ziffer 7- 8: Tag

Ziffer 9-10: Uhrzeit (GMT)

2. Zahl: Art

1 = Wind U-Komponente

2 = Wind V-Komponente

3 = Druck

4 = Lufttemperatur

5 = Spezifische Feuchte

6 = Divergenz

7 = Rotation

0 = Sonstige

3. Zahl: Ordnung

4. Zahl: Anzahl der folgenden Koeffizienten

darauf folgen bis zu 15 Koeffizienten

Lesen der Daten:

*Fortran:*

FORMAT(I5,3I2,I5,2I3,15F15.8)

Jahr,Monat,Tag,Uhrzeit,Art,Ordnung,Koeffizientenzahl,Koeffizienten

*Algol:*

READ(TERMIN,ART,ORDNUNG,Z);

FOR I:=1 UNTIL Z DO READ(E|I|);

Fileverzeichnis:

280 - 294	April	1976
295 - 309	Mai	1976
310 - 324	Juni	1976
325 - 339	Juli	1976
340 - 354	August	1976
355 - 369	September	1976
370 - 384	Oktober	1976

Pro Monat sind 15 Files angelegt:

- 1 Wind 1. - 5.
- 2 Wind 6. - 10.
- 3 Wind 11. - 15.
- 4 Wind 16. - 20.
- 5 Wind 21. - 25.
- 6 Wind 26. - Monatsende

Für jeden Termin sind hintereinander U- und V-Komponente gespeichert

- 7 Druck 1. - 10.
- 8 Druck 11. - 20.
- 9 Druck 21. - Monatsende

- 10 Temperatur 1. - 10.
- 11 Temperatur 11. - 20.
- 12 Temperatur 21. - Monatsende

- 13 Feuchte 1. - 10.
- 14. Feuchte 11. - 20.
- 15 Feuchte 21. - Monatsende

Die Länge der Files beträgt 20 - 30 Blöcke